

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

**Návrh ohříváku parovzduchové směsi pro FES a jeho posouzení z
hlediska kontrol spolehlivosti**

**Design of a heater of Steam-Air Mixture for the FES and Its Assessment
from the Viewpoint of a Reliability Monitoring System**

Student:

Bc. Bartoš Lukáš

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Vilimec Ladislav

Ostrava 2014

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Bartoš**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh ohřívačů parovzduchové směsi pro FES a jeho posouzení z hlediska systému kontrol spolehlivosti**
Design of a Heater of Steam-Air Mixture for the FES and Its Assessment from the Viewpoint of a Reliability Monitoring System

Zásady pro vypracování:

Proveďte návrh ohřívačů parovzduchové směsi (OPVS) pro Flexibilní energetický systém (FES) vč. jeho posouzení z hlediska systému kontrol spolehlivosti.

Palivo: černé ostravské uhlí.

Roštové ohniště, rošt pásový.

Parametry vzduchu: 1,013 bara; 20 °C; rel. vlhkost 60 %.

1. Vypracujte rešerši pro použití FES a spolehlivost tlakových systémů energetických zařízení
2. Proveďte stechiometrické výpočty a výpočet účinnosti kotle
3. Stanovte výrobní teplo OPVS
4. Zpracujte výpočtový projekt OPVS
5. Proveďte analýzu systému z hlediska provozní spolehlivosti

Seznam doporučené odborné literatury:

DLOUHÝ, T.: Výpočty kotlů a spalínových výměníků. Skripta ČVUT Praha. ISBN 80-01-02591-8.
<http://projekty.fs.vsb.cz/414/?ucebni-opory>.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ladislav Vilimec**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 19.5.2014



.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было с́еднано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было с́еднано, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 19.5.2014



.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Lukáš Bartoš

Adresa trvalého bydliště autora práce:

Krestova 1409/2, Ostrava, 700 30

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BARTOŠ L. *Návrh ohříváku parovzduchové směsi pro FES a jeho posouzení z hlediska systému kontrol spolehlivosti: diplomová práce.* Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2014, 72 s. Vedoucí práce: Vilimec L.

Diplomová práce se zabývá návrhem ohříváku parovzduchové směsi pro Flexibilní energetický systém. Úvod práce je zaměřen na použití Flexibilního energetického systému a přehledu technickým norem a nařízení upravující spolehlivost energetických zařízení. Další oblast je výpočet účinnosti kotle s pásovým roštem, výrobního tepla ohříváku parovzduchové směsi a samotný návrh ohříváku parovzduchové směsi. Finální část obsahuje projekční návrh a projekční výkres, který je přílohou diplomové práce.

ANNOTATION OF DISSERTATION

BARTOŠ L. *Design of a heater of Steam-Air Mixture for the FES and Its Assessment from the Viewpoint of a Reliability Monitoring System: dissertation.* Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2014, 72 s. Thesis head: Vilimec L.

This thesis describes the design of the heater steam - air mixtures for flexible energy system. Introduction is focused on the use of the flexible energy system and an overview of technical standards and regulations governing the reliability of power equipment. Another area is the calculation of the efficiency of the boiler with grate stoker, the production of heat heater steam - air mixture and the entire design of the heater steam - air mixture. The final section includes project design and project drawings annexed thesis.

Obsah

Přehled veličin	10
Zadané výpočtové parametry.....	15
1 Úvod	16
2 Flexibilní energetický systém.....	17
2.1 Ohřívač parovzduchové směsi	17
2.2 Turbogenerátor	17
2.3 Technologická část	18
2.4 Elektrická část.....	18
2.5 Parovzduchový okruh	18
3 Spolehlivost energetických tlakových zařízení	18
3.1 Kovová průmyslová potrubí a výměníky tepla	18
3.2 Netopené tlakové nádoby	19
3.3 Vodotrubné kotle, válcové kotle a pomocná zařízení.....	19
4 Prokazování kvality výrobku.....	19
5 Základní výpočty	20
6 Měrná tepelná kapacita spalin	24
7 Stanovení obsahu spalitelných látek.....	25
7.1 Zadané výpočtové parametry.....	25
7.2 Stanovení obsahu spalitelných látek v popílku.....	25
8 Tepelné ztráty kotle	26
8.1 Ztráta mechanickým nedopalem ve strusce.....	26
8.2 Ztráta mechanickým nedopalem v popílku	26
8.3 Celková ztráta mechanickým nedopalem	26
8.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	27
8.4.1 Ztráta fyzickým teplem ve strusce.....	27
8.4.2 Ztráta fyzickým teplem v popílku	27

8.4.3	Celková ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	27
8.5	Ztráta citelným teplem spalín	28
8.6	Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí.....	28
8.7	Ztráta chemickým nedopalem	28
9	Účinnost kotle.....	29
10	Množství paliva	29
11	Objemový průtok spalín	29
11.1	Tabulková hustota složek spalín.....	29
11.2	Hustota spalín	30
11.3	Přepočet hustoty spalín pro danou teplotu $t = 1176,8\text{ }^{\circ}\text{C}$	30
11.4	Objemový průtok spalín za normálních podmínek.....	31
11.5	Objemový průtok spalín při teplotě spalín $t = 1176,8\text{ }^{\circ}\text{C}$	31
11.6	Hmotnostní tok spalín.....	31
12	Schéma ohříváků parovzduchové směsi (zadané parametry).....	32
13	Fyzikální vlastnosti parovzduchové směsi	33
13.1	Měrná vlhkost nasávaného vzduchu.....	33
13.2	Koncentrace páry ve vlhkém vzduchu.....	33
13.3	Koncentrace vodní páry v parovzduchové směsi	33
13.4	Koncentrace suchého vzduchu v parovzduchové směsi.....	33
13.5	Parciální tlak vodní páry v parovzduchové směsi	34
13.6	Parciální tlak suchého vzduchu v parovzduchové směsi.....	34
13.7	Entalpie parovzduchové směsi	35
13.8	Entalpie suchého vzduchu	35
13.9	Hustota parovzduchové směsi při celkovém tlaku a teplotě pvs	36
13.10	Hustota parovzduchové směsi při normálních podmínkách.....	36
13.11	Tepelná vodivost parovzduchové směsi	36
13.12	Dynamická viskozita parovzduchové směsi.....	37

13.13	Kinematická viskozita	38
13.14	Objemový průtok PVS za normálních podmínek	38
13.15	Objemový průtok spalin při teplotě PVS $t = 375,6$ [°C]	39
14	Výrobní teplo OPVS	39
15	Entalpie spalin při teplotě $t_{SP} = 1176,8$ [°C] a tlaku $p = 0,98$ [bar]	40
15.1	Hustota složek spalin při dané teplotě a tlaku	40
15.2	Stanovení dílčích podílů jednotlivých složek spalin	40
15.3	Hmotnostní podíl jednotlivých složek spalin	40
15.4	Entalpie složek spalin při dané teplotě	41
15.5	Celková entalpie spalin na kg spalin	41
16	Výkon a výrobní teplo výměníků	41
16.1	Výkon výměníků na straně PVS	41
16.2	Výrobní teplo výměníků na straně PVS	42
17	Výpočet entalpie spalin vstupního dílu ohříváku	42
18	Návrh ohříváku parovzduchové směsi	43
18.1	Střední logaritmický teplotní spád protiproudu	44
18.2	Součinitel Ψ pro výměníky s křížovým zapojením	45
18.3	Teplotní spád	45
18.4	Výpočet základních parametrů ohříváku č. 3	46
18.5	Výpočet základních parametrů ohříváku č. 4	48
18.6	Výpočet základních parametrů ohříváku č. 5	50
19	Návrh výstupního dílu OPVS č.5	52
19.1	Střední měrná tepelná kapacita PVS	52
19.2	Prandtlovo číslo	53
19.3	Přestup tepla konvekci	53
19.4	Teplota povrchu nánosu na straně spalin	54
19.5	Efektivní tloušťka sálavé vrstvy	54

19.6	Objemová koncentrace vodní páry ve spalínách	55
19.7	Objemová koncentrace kyslíku ve spalínách	55
19.8	Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalínách	56
19.9	Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalínách	56
19.10	Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny	57
19.11	Hmotnost spalin	57
19.12	Koncentrace popela ve spalínách	58
19.13	oučinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi	58
19.14	Exponent stupně černosti spalin	59
19.15	Stupeň černosti proudu spalin	59
19.16	Součinitel přestupu tepla sáláním	59
19.17	Součinitel prostupu tepla	60
19.18	Výhřevná plocha ohříváku	60
19.19	Výhřevná plocha jedné desky	61
19.20	Výška desky	61
20	Plán kontrol a zkoušek	62
21	Projekční návrh	68
22	Závěr	69
	Poděkování	70
23	Seznam použité literatury	71
	Seznam obrázků	72
	Seznam tabulek	72
	Seznam schémat	72
	Seznam zkratk	72
	Seznam příloh	72

Přehled veličin

A	$[m]$	výška prostoru mezi deskami
B	$[m]$	šířka prostoru mezi deskami
C	$[m]$	hloubka prostoru mezi deskami
$S_1^{Výhř}$	$[m^2]$	výhřevná plocha jedné desky
C_{pCO_2}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita oxidu uhličitého
C_{pH_2O}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita vodní páry
C_{pN_2}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita dusíku
C_{pO_2}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita kyslíku
C_{pSO_2}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita oxidu siřičitého
C_{POP}	$[\%]$	obsah spalitelných látek v popílku
C_{STR}	$[\%]$	obsah spalitelných látek ve strusce
C_{pPOP}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita popílku
C_{pSTR}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita strusky
G_S	$[kg \cdot kg^{-1}]$	hmotnostní tok spalin
M_{pal}	$[kg \cdot s^{-1}]$	množství paliva
M_{sv}	$[kg \cdot kmol^{-1}]$	molární hmotnost suchého vzduchu
M_{vp}	$[kg \cdot kmol^{-1}]$	molární hmotnost vodní páry
P_R	$[-]$	Prandtlovo číslo
P_{pPal}	$[bar]$	příkon v palivu
$\frac{Q+Q_{sal}}{s}$	$[kW \cdot m^{-2}]$	tepelné zatížení
Q_5^{SP}	$[kW]$	tepelný výkon na straně spalin
$Q_{VÝR}^{OPVS}$	$[kJ \cdot s^{-1}]$	výrobní teplo ohříváku pvs
Q_i	$[MJ \cdot kg^{-1}]$	výhřevnost paliva
Q_{nC}	$[MJ \cdot kg^{-1}]$	výhřevnost uhlíku
Q_{nr}	$[MJ \cdot kg^{-1}]$	redukovaná výhřevnost
S	$[m^2]$	výhřevná plocha ohříváku
S_1	$[m^2]$	průtočná plocha 1
S_2	$[m^2]$	průtočná plocha 2
T_N	$[K]$	normální teplota
$T_{PVS}^{Výst}$	$[K]$	teplota na výstupu

T_{PVS}^{Vst}	[K]	teplota na vstupu
V_{CO_2}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	objem oxidu uhličitého
V_{CO_2min}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	minimální objem kyslíku
V_{H_2O}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	objem vodní páry
V_{N_2}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	objem dusíku
V_{O_2}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	objem kyslíku
V_{SO_2}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	objem oxidu siřičitého
V_{PVS}^N	$[m_N^3 \cdot s^{-1}]$	objemový průtok pvs za normálních podmínek
V_{PVS}^t	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	objemový průtok pvs při dané teplotě
V_{SPV}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	objem vlhkých spalín
V_{SPV}^t	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$	objem vlhkých spalín při zadané teplotě
V_{VZS}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	objem vzduchu skutečného suchého
V_{VZSmin}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	stechiometrické množství suchého vzduchu
V_{VZV}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	objem vzduchu skutečného vlhkého
V_{VZVmin}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	stechiometrické množství vlhkého vzduchu
X_{POP}	[%]	množství popela odváděného jako popílek
X_{STR}	[%]	množství popela odváděného jako struska
Z_C	[-]	celková ztráta mechanickým nedopalem
Z_{CO}	[-]	ztráta chemickým nedopalem
Z_{CPOP}	[-]	ztráta mechanickým nedopalem v popílku
Z_{CSTR}	[-]	ztráta mechanickým nedopalem ve strusce
Z_{fPOP}	[-]	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků v popílku
Z_{fSTR}	[-]	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků ve strusce
Z_{SV}	[-]	ztráta sáláním a vedením tepla do okolí
Z_f	[-]	celková ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
Z_k	[-]	ztráta citelným teplem spalín
a	[-]	stupeň černosti proudu spalín
a_{desky}	[m]	výška desky
b_{desky}	[m]	šířka desky
c_{p5}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	střední měrná tepelná kapacita
c_{sv}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	střední měrná tepelná kapacita suchého vzduchu

d	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	měrná vlhkost vlhkého vzduchu
f	$[m^2]$	vnitřní průřez desky
$i_{PVS}^{t=700}$	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	entalpie na vstupu
$i_{PVS}^{t=800}$	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	entalpie na výstupu
i_{sm}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	entalpie parovzduchové směsi
i_{sv}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	entalpie suchého vzduchu
i_{vp}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	entalpie vodní páry
k	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel prostupu tepla
$k \cdot p \cdot s$	$[-]$	exponent stupně černosti spalin
$k_s \cdot r_s$	$[-]$	součinitel zeslabení tříatomovými plyny
m_{CO_2}	$[kg \cdot kg^{-1}]$	hmotnostní podíl dané složky spalin
m_{H_2O}	$[kg \cdot kg^{-1}]$	hmotnostní podíl dané složky spalin
m_{N_2}	$[kg \cdot kg^{-1}]$	hmotnostní podíl dané složky spalin
m_{O_2}	$[kg \cdot kg^{-1}]$	hmotnostní podíl dané složky spalin
m_{SO_2}	$[kg \cdot kg^{-1}]$	hmotnostní podíl dané složky spalin
n_1	$[-]$	počet trubek
n_2	$[-]$	počet trubek
p_N	$[bar]$	normální tlak
p_c	$[bar]$	celkový tlak parovzduchové směsi
$p_{p,s}$	$[bar]$	parciální tlak suchého vzduchu ve vlhkém vzduchu
$p_{p,vl}$	$[bar]$	parciální tlak vodní páry ve vlhkém vzduchu
p_s	$[MPa]$	celkový parciální tlak tříatomových plynů
p_{sv}	$[bar]$	parciální tlak suchého vzduchu v pvs
p_{vp}	$[bar]$	parciální tlak vodní páry v pvs
r_{H_2O}	$[-]$	objemová koncentrace vodní páry ve spalinách
r_{O_2}	$[-]$	objemová koncentrace kyslíku ve spalinách
r_s	$[-]$	objemová koncentrace tříatomových plynů
r_{sv}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K]$	měrná plynová konstanta suchého vzduchu
r_{vp}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K]$	měrná plynová konstanta vodní páry
s	$[m]$	efektivní tloušťka sálavé vrstvy
t_{PVS}	$[^{\circ}C]$	teplota parovzduchové směsi
$t_{stř5}$	$[^{\circ}C]$	střední teplota PVS

t_z	[°C]	teplota povrchu nánosů na straně spalín
w_{pd}	[kg · kg ⁻¹]	koncentrace vodní páry ve vlhkém vzduchu
w_{pp}	[kg · kg ⁻¹]	koncentrace procesní páry v pvs
w_{sv}	[kg · kg ⁻¹]	koncentrace suchého vzduchu v pvs
w_{vd}	[kg · kg ⁻¹]	koncentrace vodní páry v pvs
y_{sv}	[kmol · kmol ⁻¹]	molární koncentrace suchého vzduchu v pvs
y_{vp}	[kmol · kmol ⁻¹]	molární koncentrace vodní páry v pvs
α_N	[W · m ⁻² · K ⁻¹]	nomogramový součinitel
α_p	[W · m ⁻² · K ⁻¹]	přestup tepla konvekci
α_{sal}	[W · m ⁻² · K ⁻¹]	součinitel přestup tepla sáláním
Δt_v	[°C]	střední logaritmický teplotní spád
Δt	[°C]	teplotní spád
ε	[m ² · K · W ⁻¹]	součinitel pro výměníky s křížovým zapojením
Ψ	[–]	součinitel pro výměníky s křížovým zapojením
φ	[–]	relativní vlhkost vlhkého vzduchu
η_{sm}	[kg · m ⁻¹ · s ⁻¹]	dynamická viskozita pvs
η_{sv}	[kg · m ⁻¹ · s ⁻¹]	dynamická viskozita suchého vzduchu
η_{vp}	[kg · m ⁻¹ · s ⁻¹]	dynamická viskozita vodní páry
λ_{sm}	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	tepelná vodivost pvs
λ_{sv}	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	tepelná vodivost suchého vzduchu
λ_{vp}	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	tepelná vodivost vodní páry
μ_{pk}	[kg · kg ⁻¹]	koncentrace popela ve spalínách
ν_{sm}	[m ² · s ⁻¹]	kinematická viskozita pvs
ρ_{CO_2}	[kg · m ⁻³]	hustota oxidu uhličitého
ρ_{H_2O}	[kg · m ⁻³]	hustota vodní páry
ρ_{N_2}	[kg · m ⁻³]	hustota dusíku
ρ_{O_2}	[kg · m ⁻³]	hustota kyslíku
ρ_{SO_2}	[kg · m ⁻³]	hustota oxidu siřičitého
ρ_{SP}^t	[kg · m ⁻³]	hustota spalín při zadané teplotě
$\rho_{sm,N}$	[kg · m ⁻³]	hustota pvs při normálních podmínkách
ρ_{sm}	[kg · m ⁻³]	hustota pvs

ρ_{sp}	$[kg \cdot m_N^{-3}]$	hustota spalin
ω_{CO_2}	$[\%]$	koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách
ω_{H_2O}	$[\%]$	koncentrace vodní páry ve spalinách
ω_{N_2}	$[\%]$	koncentrace dusíku ve spalinách
ω_{O_2}	$[\%]$	koncentrace kyslíku ve spalinách
ω_{SO_2}	$[\%]$	koncentrace oxidu siřičitého ve spalinách
ω_1	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost proudění média
ω_2	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost proudění média

Zadané výpočtové parametry

Parametry vzduchu

$$p_v = 1,013 \quad [bar]$$

$$t_v = 20 \quad [^{\circ}C]$$

$$vlhost_{relativni} = 60 \quad [\%]$$

Prvkový rozbor surového vzorku černého ostravského uhlí

$$C^r = 60,22 \quad [\%]$$

$$H^r = 3,59 \quad [\%]$$

$$N^r = 0,85 \quad [\%]$$

$$S^r = 0,37 \quad [\%]$$

$$O_2^r = 4,83 \quad [\%]$$

$$A^r = 22,04 \quad [\%]$$

$$W^r = 8,1 \quad [\%]$$

$$\Sigma 100 \quad [\%]$$

Výhřevnost paliva

$$Q_i^r = 23,42 \quad [MJ/kg]$$

Přebytek vzduchu ve spalovací komoře

$$\alpha_0 = 1,3 \quad [-]$$

Přebytek vzduchu za kotlem

$$\alpha_K = 1,4 \quad [-]$$

Teplota spalin

$$t_{SP} = 130 \quad [^{\circ}C]$$

Teplota strusky

$$t_{STR} = 500 \quad [^{\circ}C]$$

Podíl popela ve strusce

$$C_{STR} = 4 \quad [\%]$$

$$X_{STR} = 65 \quad [\%]$$

Podíl popela z celkového množství v palivu

$$X_{POP} = 35 \quad [\%]$$

1 Úvod

Předmětem řešení diplomové práce je návrh ohřívačku parovzduchové směsi pro Flexibilní energetický systém a nastínění, jak by mohl vypadat montážní a výrobní Plán kontrol a zkoušek pro výměník tepla.

První část obsahuje řešerži týkající se použití Flexibilního energetického systému a přehledu technickým norem a nařízení, které upravují spolehlivost energetických zařízení.

Další oblastí je výpočet účinnosti kotle s pásovým roštem a výrobního tepla ohřívačku parovzduchové směsi, další výpočty jsou orientovány pro samotný návrh ohřívačku, kde ze zadaných parametrů parovzduchové směsi byly určeny fyzikální vlastnosti parovzduchové směsi potřebné pro samotný výpočet ohřívačku parovzduchové směsi.

Poslední kapitola zahrnuje projekční návrh a výkres č. FSKE–19011989 s několika řezy, detailem tkaninového těsnění a pohledem do výsypky.

2 Flexibilní energetický systém

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [4].

Důvodem vývoje Flexibilního energetického systému (FES) bylo dosažení zvýšení účinnosti přeměny primární energie biomasy i alternativních paliv novým energetickým systémem a to i odpadním teplem z tepelných zařízení včetně primární energie z odpadních plynů, které jsou nepoužitelné pro přímé použití ve spalovací plynové turbíně při kogeneraci a výrobě elektrické energie.

V případě komerčního typu provedení flexibilního energetického systému může být uhlí spalováno na roštovém ohništi, kde spaliny dosahují teplot kolem $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, které jsou dále chlazeny v ohříváku parovzduchové směsi. Chlazením spalovací komory vzniká pára, která se smísí se vzduchem z kompresoru plynové turbíny a vzniklou směs těchto médií nazýváme parovzduchovou směsí, která se v ohříváku ohřeje na teplotu okolo $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. V plynové turbíně dochází k expanzi parovzduchové směsi a posléze je zchlazována ve spalínovém kotli.

2.1 Ohřívák parovzduchové směsi

Ohřívák parovzduchové směsi (OPVS) je využíván pro ohřev tlakové parovzduchové směsi s proměnlivým podílem páry na teplotu okolo $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ spalínami, které vznikají spalováním paliva ve spalovací komoře.

Konstrukčně je řešen jako výměník s protiproudovým a kombinovaným protiproudovým - souproudovým provedením s křížovým prouděním spalín. Dále je také opatřen havarijním chlazením, které zprostředkovává vstřik syté páry do PVS.

2.2 Turbogenerátor

Pro přeměnu tepelné energie, která je obsažena v PVS bude použita spalovací turbína, jejímž pracovním médiem je PVS, která vznikne smíšením vzduchu dodávaného kompresorem plynové turbíny a páry, vyrobené ve výparníku kotle. Kompresor turbogenerátoru je navržen pro potřeby FES.

2.3 Technologická část

Jednotka flexibilního energetického systému bude umístěna v kotelně klasického typu. Hlavní zařízení jsou turbogenerátor s nepřímým ohřevem pracovního média, spalovací komora s roštovým ohništěm a výparník s přirozenou cirkulací. Dále OPVS a ohřívač spalovacího vzduchu. Ohřívač NV se v tomto případě nepoužívá.

2.4 Elektrická část

Elektrická část bude obsahovat generátorový rozvaděč se vzduchovým odpojovačem, který má funkci připojovací a jistící k elektrickému generátoru. Dále také rozvaděč vlastní spotřeby se systémem řízení a jistění jednotky, bude také obsahovat záložní zdroj napětí, který bude především využíván k napájení řídicího systému.

2.5 Parovzduchový okruh

Je využíván k dopravě pracovního média (vzduchu a PVS) od sání přes ohřívač parovzduchové směsi do turbíny a po následné expanzi dochází k předání tepelné energie u RC s parní turbínou a kotlem HRSG a na konci se PVS vypouští do ovzduší.

3 Spolehlivost energetických tlakových zařízení

Většina informací z této kapitoly byla čerpána z literatury [3].

Na základě legislativních požadavků na zpracování technických a technologických parametrů tlakových energetických zařízení jsou vydávány technické normy, které jsou dále členěny podle jednotlivého typu zařízení včetně jejich sestav a jejich využití v energetice:

3.1 Kovová průmyslová potrubí a výměníky tepla

Na toto zařízení se vztahuje norma ČSN EN 13480-1 až 8. Každý systém potrubí čelí během své životnosti řadě zatížení a to především vnitřní a vnější tlak, teplota, klimatická zatížení, pohyby podloží a staveb, zemětřesení a mnoho dalších.

3.2 Netopené tlakové nádoby

Na ně se norma ČSN EN 13445-1 až 8. Netopené tlakové nádoby jsou během svého provozu vystaveny mnohým zatížením: vnitřní nebo vnější tlak, maximální hydrostatický tlak obsažené tekutiny při normálních podmínkách, napětí vyvolaná opěrnými nohami, ohybové momenty atd.

3.3 Vodotrubné kotle, válcové kotle a pomocná zařízení

Jsou upravovány normami ČSN EN 12952-1 až 16, ČSN EN 12953-1 až 12, v době provozu vyhláška číslo 18/1979 Sb. Vodotrubný i válcový kotel je podroben vnitřnímu tlaku, teplotě, ohýbání bubnu nebo komory jako nosníku vlivem hmotnosti, teplem indukované síly a momenty, které vznikají v systémech potrubí nebo jejich působením a mnohé další.

4 Prokazování kvality výrobku

Kvalita výrobků je ověřována souhrnem odzkoušených předepsaných vlastností, ověřením spolehlivé funkce a bezpečnosti i předpovědi životnosti daného výrobku.

Kvalita každého výrobku je určena souhrnem požadavků projektové, konstrukční, technologické, výrobní, kontrolní, zkušební a provozní dokumentace, eventuálně servisní dokumentace.

Kvalita výrobků je tedy ověřována na základě splnění základních bezpečnostně – technických požadavků na daný výrobek.

Pro každý výrobek musí být stanovena kritéria rizik, která určují bezpečnostní rámec pro spolehlivý a bezpečný provoz výrobku, uváděného na trh a do provozu dle zák. č. 34/2011 Sb., č. 155/2010 Sb., č. 490/2009 Sb. a č. 22/1997 Sb. ve znění pozdějších předpisů, příslušných nařízení vlády (NV) CZ – právně-technických předpisů, evropských předpisů (směrnic ES, EHS, EC,...), harmonizovaných technických norem, určených výrobních norem (EN, EN ISO) i národních technických norem (např. ČSN, DIN, BS, AFNOR, ASME, API, aj.).

5 Základní výpočty

Minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{O_2min} = 22,39 \cdot \frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \quad (5 - 1)$$

$$V_{O_2min} = 22,39 \cdot \frac{0,6022}{12,01} + \frac{0,0359}{4,032} + \frac{0,0037}{32,06} - \frac{0,0483}{32}$$

$$V_{O_2min} = 1,2908 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Minimální objem suchého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{VZSmin} = \frac{V_{O_2min}}{0,2103} \quad (5 - 2)$$

$$V_{VZSmin} = \frac{1,2908}{0,2103}$$

$$V_{VZSmin} = 6,1379 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Kde:

V_{O_2min}	Minimální objem kyslíku	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
--------------	-------------------------	-------------------------

V_{VZSmin}	Minimální objem suchého vzduchu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
--------------	---------------------------------	-------------------------

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{VZVmin} = v \cdot V_{VZSmin} \quad (5 - 3)$$

$$V_{VZVmin} = 1,03 \cdot 6,1379$$

$$V_{VZVmin} = 6,3220 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Kde:

V_{VZVmin}	Minimální objem vlhkého vzduchu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
--------------	---------------------------------	-------------------------

v	Součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti	$[-]$
-----	--	-------

Skutečný objem suchého vzduchu při přebytku α_0

$$V_{VZS} = \alpha_0 \cdot V_{VZS_{min}} \quad (5 - 4)$$

$$V_{VZS} = 1,3 \cdot 6,1379$$

$$V_{VZS} = 7,9793 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Kde:

V_{VZS}	Skutečný objem suchého vzduchu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
-----------	--------------------------------	-------------------------

α_0	Přebytek vzduchu ve spalovací komoře	$[-]$
------------	--------------------------------------	-------

$V_{VZS_{min}}$	Minimální objem suchého vzduchu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
-----------------	---------------------------------	-------------------------

Skutečný objem vlhkého vzduchu

$$V_{VZV} = v \cdot V_{VZS} \quad (5 - 5)$$

$$V_{VZV} = 1,03 \cdot 7,9793$$

$$V_{VZV} = 8,2186 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Kde:

V_{VZV}	Skutečný objem vlhkého vzduchu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
-----------	--------------------------------	-------------------------

v	Součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti	$[-]$
-----	--	-------

Objem oxidu uhličitého

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r \quad (5 - 6)$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,6022$$

$$V_{CO_2} = 1,1162 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem oxidu siřičitého

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r \quad (5 - 7)$$

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0037$$

$$V_{SO_2} = 0,0025 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem dusíku

$$V_{N_2} = \frac{22,39}{28,016} \cdot N^r + 0,79 \cdot V_{VZS} \quad (5 - 8)$$

$$V_{N_2} = \frac{22,39}{28,016} \cdot 0,0085 + 0,79 \cdot 7,9793$$

$$V_{N_2} = 6,3104 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem kyslíku

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha_K - 1) \cdot V_{VZV_{min}} \quad (5 - 9)$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (1,4 - 1) \cdot 6,3220$$

$$V_{O_2} = 0,5310 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem suchých spalin

$$V_{SPS} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \quad (5 - 10)$$

$$V_{SPS} = 1,1162 + 0,0025 + 6,3104 + 0,5310$$

$$V_{SPS} = 7,9601 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Kde:

V_{SPS}	Objem suchých spalin	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
-----------	----------------------	-------------------------

V_{CO_2}	Objem oxidu uhličitého	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
------------	------------------------	-------------------------

V_{SO_2}	Objem oxidu siřičitého	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
------------	------------------------	-------------------------

V_{N_2}	Objem dusíku	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
-----------	--------------	-------------------------

V_{O_2}	Objem kyslíku	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
-----------	---------------	-------------------------

Objem vodní páry ze spalování vodíku z odpařené vlhkosti paliva a z vlhkosti vzduchu

$$V_{H_2O} = \frac{22,39}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,39}{18,016} \cdot W^r + (\nu - 1) \cdot V_{VZS} \quad (5 - 11)$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,39}{4,032} \cdot 0,0359 + \frac{22,39}{18,016} \cdot 0,081 + (1,03 - 1) \cdot 7,9793$$

$$V_{H_2O} = 0,5394 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem vlhkých spalin

$$V_{SPV} = V_{H_2O} + V_{SPS} \quad (5 - 12)$$

$$V_{SPV} = 0,5394 + 7,6901$$

$$V_{SPV} = 8,4995 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem vlhkých spalin při teplotě $t_{SP} = 130^\circ C$

$$V_{SPV}^{t_{SP}} = V_{SPV} \cdot \frac{273 + t_{SP}}{273} \quad (5 - 13)$$

$$V_{SPV}^{t_{SP}} = 8,4995 \cdot \frac{273 + 130}{273}$$

$$V_{SPV}^{t_{SP}} = 12,5469 [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Procentní složení spalin

$$\omega_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{SPV}} \cdot 100 = \frac{1,1162}{8,4995} \cdot 100 = 13,1 [\%] \quad (5 - 14)$$

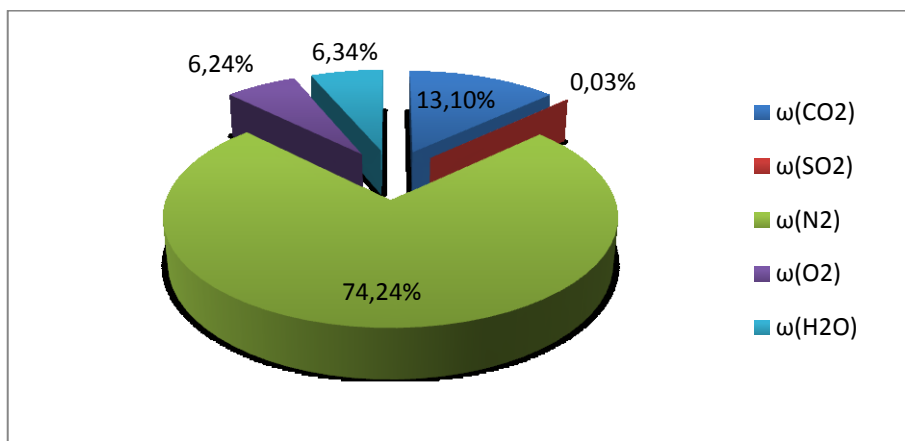
$$\omega_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{SPV}} \cdot 100 = \frac{0,0025}{8,4995} \cdot 100 = 0,029 [\%] \quad (5 - 15)$$

$$\omega_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{SPV}} \cdot 100 = \frac{6,3104}{8,4995} \cdot 100 = 74,24 [\%] \quad (5 - 16)$$

$$\omega_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{SPV}} \cdot 100 = \frac{0,5310}{8,4995} \cdot 100 = 6,24 [\%] \quad (5 - 17)$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{SPV}} \cdot 100 = \frac{0,5394}{8,4995} \cdot 100 = 6,34 [\%] \quad (5 - 18)$$

$$\sum \omega = 100 [\%]$$



Obrázek 5-1 Procentní složení spalin

6 Měrná tepelná kapacita spalin

K výpočtu měrné tepelné kapacity spalin ($t_{sp} = 130 [^{\circ}\text{C}]$) jsem využil interpolační metody, příslušné hodnoty jsem odečetl z tab.4-9 Střední měrné tepelné kapacity základních složek spalin z literatury [1].

$t [^{\circ}\text{C}]$	$c_p [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$					
	O_2	N_2	CO_2	CO	SO_2	<i>vodní pára</i>
0	1,3039	1,2949	1,6007	1,3012	1,7792	1,4933
100	1,3193	1,2951	1,6996	1,3021	1,8631	1,5062
200	1,3372	1,2994	1,7863	1,3105	1,9427	1,5227

Tabulka 6-1 Střední měrné tepelné kapacity základních složek spalin

$$C_{pN_2} = \frac{1,7863 - 1,6996}{200 - 100} \cdot (130 - 100) + 1,6996 = 1,7256 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (6 - 1)$$

$$C_{pSO_2} = \frac{1,9427 - 1,8631}{200 - 100} \cdot (130 - 100) + 1,8631 = 1,8870 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (6 - 2)$$

$$C_{pN_2} = \frac{1,2994 - 1,2951}{200 - 100} \cdot (130 - 100) + 1,2951 = 1,2964 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (6 - 3)$$

$$C_{pO_2} = \frac{1,3372 - 1,3193}{200 - 100} \cdot (130 - 100) + 1,3193 = 1,3247 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (6 - 4)$$

$$C_{pH_2O} = \frac{1,5227 - 1,5062}{200 - 100} \cdot (130 - 100) + 1,5062 = 1,5112 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (6 - 5)$$

$$C_{pSP} = C_{pCO_2} \cdot \omega_{CO_2} + C_{pSO_2} \cdot \omega_{SO_2} + C_{pN_2} \cdot \omega_{N_2} + C_{pO_2} \cdot \omega_{O_2} + C_{pH_2O} \cdot \omega_{H_2O} \quad (6 - 6)$$

$$C_{pSP} = 1,7256 \cdot 0,124 + 1,8870 \cdot 0,00028 + 1,2964 \cdot 0,7548 + 1,3247 \cdot 0,05 + 1,5112 \cdot 0,062$$

$$C_{pSP} = 1,3530 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

7 Stanovení obsahu spalitelných látek

7.1 Zadané výpočtové parametry

$$K_S = 3 \quad [\%]$$

$$Q_{nC} = 32,7 \quad [\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

7.2 Stanovení obsahu spalitelných látek v popílku

$$a_s = \frac{C_{STR} \cdot X_{STR}}{100 - C_{STR}} \quad (7 - 1)$$

$$a_s = \frac{4 \cdot 65}{100 - 4}$$

$$a_s = 2,7083 \quad [\%]$$

$$z_0 = \frac{100 \cdot K_S \cdot Q_{nr}}{A^r \cdot Q_{nC}} \quad (7 - 2)$$

$$z_0 = \frac{100 \cdot 3 \cdot 23,42}{22,04 \cdot 32,7}$$

$$z_0 = 9,7487 \quad [\%]$$

$$C_{POP} = \frac{100 \cdot (z_0 - a_s)}{X_{POP} + z_0 - a_s} \quad (7 - 3)$$

$$C_{POP} = \frac{100 \cdot (9,7487 - 2,7083)}{35 + 9,7487 - 2,7083}$$

$$C_{POP} = 16,7467 \quad [\%]$$

Kde:

C_{STR}	Obsah spalitelných látek ve strusce	$[\%]$
C_{POP}	Obsah spalitelných látek v popílku	$[\%]$
X_{STR}	Množství popela odváděného jako struska	$[\%]$
X_{POP}	Množství popela odváděného jako popílek	$[\%]$
Q_{nr}	Redukovaná výhřevnost	$[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
Q_{nC}	Výhřevnost uhlíku	$[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
A^r	Obsah popela v surovém palivu	$[\%]$

8 Tepelné ztráty kotle

8.1 Ztráta mechanickým nedopalem ve strusce

$$Z_{C_{STR}} = \frac{C_{STR}}{1 - C_{STR}} \cdot X_{STR} \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot Q_{ci} \quad (8 - 1)$$

$$Z_{C_{STR}} = \frac{0,04}{1 - 0,04} \cdot 0,65 \cdot \frac{0,2204}{23420} \cdot 32600$$

$$Z_{C_{STR}} = 0,0083 [-]$$

Kde:

C_{STR} Obsah spalitelných látek ve strusce [%]

X_{STR} Množství popela odváděného jako struska [%]

8.2 Ztráta mechanickým nedopalem v popílku

$$Z_{C_{POP}} = \frac{C_{POP}}{1 - C_{POP}} \cdot X_{POP} \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot Q_{ci} \quad (8 - 2)$$

$$Z_{C_{POP}} = \frac{0,17}{1 - 0,17} \cdot 0,35 \cdot \frac{0,2204}{23420} \cdot 32600$$

$$Z_{C_{POP}} = 0,022 [-]$$

Kde:

C_{POP} Obsah spalitelných látek v popílku [%]

X_{POP} Množství popela odváděného jako popílek [%]

8.3 Celková ztráta mechanickým nedopalem

$$Z_C = Z_{C_{STR}} + Z_{C_{POP}} \quad (8 - 3)$$

$$Z_C = 0,0083 + 0,022$$

$$Z_C = 0,0303 [-]$$

8.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků se skládá ze ztrát v popílku a strusce.

8.4.1 Ztráta fyzickým teplem ve strusce

$$c_{pSTR} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{STR} \quad (8 - 4)$$

$$c_{pSTR} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 500$$

$$c_{pSTR} = 0,963 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$Z_{fSTR} = \frac{X_{STR}}{1 - C_{STR}} \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot c_{pSTR} \cdot t_{STR} \quad (8 - 5)$$

$$Z_{fSTR} = \frac{0,65}{1 - 0,04} \cdot \frac{0,2204}{23420} \cdot 0,963 \cdot 500$$

$$Z_{fSTR} = 0,0031 [-]$$

8.4.2 Ztráta fyzickým teplem v popílku

$$c_{pPOP} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{POP} \quad (8 - 6)$$

$$c_{pPOP} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 130$$

$$c_{pPOP} = 0,7773 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$Z_{fPOP} = \frac{X_{POP}}{1 - C_{POP}} \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot c_{pPOP} \cdot t_{POP} \quad (8 - 7)$$

$$Z_{fPOP} = \frac{0,35}{1 - 0,17} \cdot \frac{0,2204}{23420} \cdot 0,7773 \cdot 130$$

$$Z_{fPOP} = 0,0004 [-]$$

8.4.3 Celková ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$Z_f = Z_{fSTR} + Z_{fPOP} \quad (8 - 8)$$

$$Z_f = 0,0031 + 0,0004$$

$$Z_f = 0,0035 [-]$$

8.5 Ztráta citelným teplem spalin

$$Z_K = (1 - Z_C) \cdot \frac{V_{SPV}^{t_{SP}} \cdot c_{pSP} \cdot (t_{SP} - t_O)}{Q_i} \quad (8 - 9)$$

$$Z_K = (1 - 0,0303) \cdot \frac{12,5469 \cdot 1,3530 \cdot (130 - 20)}{23420}$$

$$Z_K = 0,0773 [-]$$

Kde:

Z_C	Celková ztráta mechanickým nedopalem	$[-]$
$V_{SPV}^{t_{SP}}$	Objem vlhkých spalin při teplotě $t_{SP} = 130^\circ\text{C}$	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
c_{pSP}	Měrná tepelná kapacita spalin	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
t_{SP}	Teplota spalin	$[^\circ\text{C}]$
t_O	Teplota okolí	$[^\circ\text{C}]$
Q_i	Výhřevnost paliva	$[MJ \cdot kg^{-1}]$

8.6 Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí

Tato ztráta u kotlů, které se používají nyní s dobrou izolací a oplechováním ošetřeným navíc hliníkovou barvou je velmi malá a klesá s velikostí kotle.

Jmenovitý výkon kotle	Z_{SV}
2 MW	0,030
10 MW	0,020
20 MW	0,013
50 MW	0,010
100 MW	0,006
500 MW	0,004

Tabulka 8-1 Ztráty sdílením tepla do okolí

$$Z_{SV} = 0,0052 [-]$$

8.7 Ztráta chemickým nedopalem

Tato ztráta je daná emisním limitem CO, který je předepsán vyhláškou, vzhledem k emisnímu limitu můžeme tuto ztrátu zanedbat.

$$Z_{CO} = 0 [-] \quad (8 - 10)$$

9 Účinnost kotle

$$\eta_K = (1 - Z_C - Z_f - Z_K - Z_{SV} - Z_{CO}) \cdot 100 \quad (9 - 1)$$

$$\eta_K = (1 - 0,0303 - 0,0035 - 0,0773 - 0,0052 - 0) \cdot 100$$

$$\eta_K = 88,37 \text{ [\%]}$$

10 Množství paliva

V tomto případě se stanoví ze zadaného příkonu v přivedeném palivu $P_{ppal} = 138136 \text{ [kW]}$.

$$M_{pal} = \frac{P_{ppal}}{Q_i} \quad (10 - 1)$$

$$M_{pal} = \frac{138136}{23420}$$

$$M_{pal} = 5,8982 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Kde:

P_{ppal} Příkon v palivu $[\text{kW}]$

Q_i Výhřevnost paliva $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$

11 Objemový průtok spalin

11.1 Tabulková hustota složek spalin

Název složky spalin	Hustota $\rho [\text{kg}/\text{m}_N^3]$
ρ_{CO_2}	1,97768
ρ_{H_2O}	0,5977
ρ_{O_2}	1,429
ρ_{N_2}	1,2506
ρ_{SO_2}	2,63

Tabulka 11-1 Tabulková hustota složek spalin

11.2 Hustota spalin

$$\rho_{SPAL} = \frac{\rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2} + \rho_{SO_2} \cdot V_{SO_2} + \rho_{N_2} \cdot V_{N_2} + \rho_{O_2} \cdot V_{O_2} + \rho_{H_2O} \cdot V_{H_2O}}{V_{SPV}} \quad (11 - 1)$$

$$\rho_{SPAL} = \frac{1,9777 \cdot 1,116 + 2,63 \cdot 0,0025 + 1,25 \cdot 6,31 + 1,429 \cdot 0,53 + 0,5977 \cdot 0,5394}{8,4995}$$

$$\rho_{SPAL} = 1,3154 \text{ [kg} \cdot \text{m}_N^{-3}\text{]}$$

Kde:

ρ_{CO_2}	Hustota oxidu uhličitého	$[\text{kg} \cdot \text{m}_N^{-3}]$
V_{CO_2}	Objem oxidu uhličitého	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
ρ_{SO_2}	Hustota oxidu siřičitého	$[\text{kg} \cdot \text{m}_N^{-3}]$
V_{SO_2}	Objem oxidu siřičitého	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
ρ_{N_2}	Hustota dusíku	$[\text{kg} \cdot \text{m}_N^{-3}]$
V_{N_2}	Objem dusíku	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
ρ_{O_2}	Hustota kyslíku	$[\text{kg} \cdot \text{m}_N^{-3}]$
V_{O_2}	Objem kyslíku	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
ρ_{H_2O}	Hustota vodní páry	$[\text{kg} \cdot \text{m}_N^{-3}]$
V_{H_2O}	Objem vodní páry	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

11.3 Přepočet hustoty spalin pro danou teplotu $t = 1176,8$ [°C]

$$\rho_{SPAL} \cdot T_1 = \rho_{SPAL}^{t_{SP}} \cdot T_2 \quad (11 - 2)$$

$$1,3154 \cdot 273,15 = \rho_{SPAL}^{t_{SP}} \cdot (273,15 + 1176,8)$$

$$\rho_{SPAL}^{t_{SP}} = \frac{1,3154 \cdot 273,15}{273,15 + 1176,8}$$

$$\rho_{SPAL}^{t_{SP}} = 0,2478 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

11.4 Objemový průtok spalin za normálních podmínek

$$V_{SP}^N = M_{pal} \cdot V_{SPV} \quad (11 - 3)$$

$$V_{SP}^N = 5,8982 \cdot 8,4995$$

$$V_{SP}^N = 50,13 [m_N^3 \cdot s^{-1}]$$

Kde:

$$M_{pal} \quad \text{Množství paliva} \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

$$V_{SPV} \quad \text{Objemové množství vlhkých spalin} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

11.5 Objemový průtok spalin při teplotě spalin $t = 1176,8 [^{\circ}C]$

$$\frac{V_{SP}^N}{T_1} = \frac{V_{SP}^{t=1176,8}}{T_2} \quad (11 - 4)$$

$$V_{SP}^N \cdot T_2 = V_{SP}^{t=1176,8} \cdot T_2$$

$$50,13 \cdot (273,15 + 1176,8) = V_{SP}^{t=1176,8} \cdot 273,15$$

$$V_{SP}^{t=1176,8} = \frac{50,13 \cdot (273,15 + 1176,8)}{273,15}$$

$$V_{SP}^{t=1176,8} = 266,102 [m^3 \cdot s^{-1}]$$

11.6 Hmotnostní tok spalin

$$\dot{m}_{SP} = V_{SP}^N \cdot \rho_{SPAL} \quad (11 - 5)$$

$$\dot{m}_{SP} = 50,13 \cdot 1,3154$$

$$\dot{m}_{SP} = 65,94 [kg \cdot s^{-1}]$$

Kde:

$$\rho_{SPAL} \quad \text{Hustota spalin} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$$V_{SP}^N \quad \text{Objemový průtok spalin za normálních podmínek} \quad [m_N^3 \cdot s^{-1}]$$

12 Schéma ohříváků parovzduchové směsi (zadané parametry)

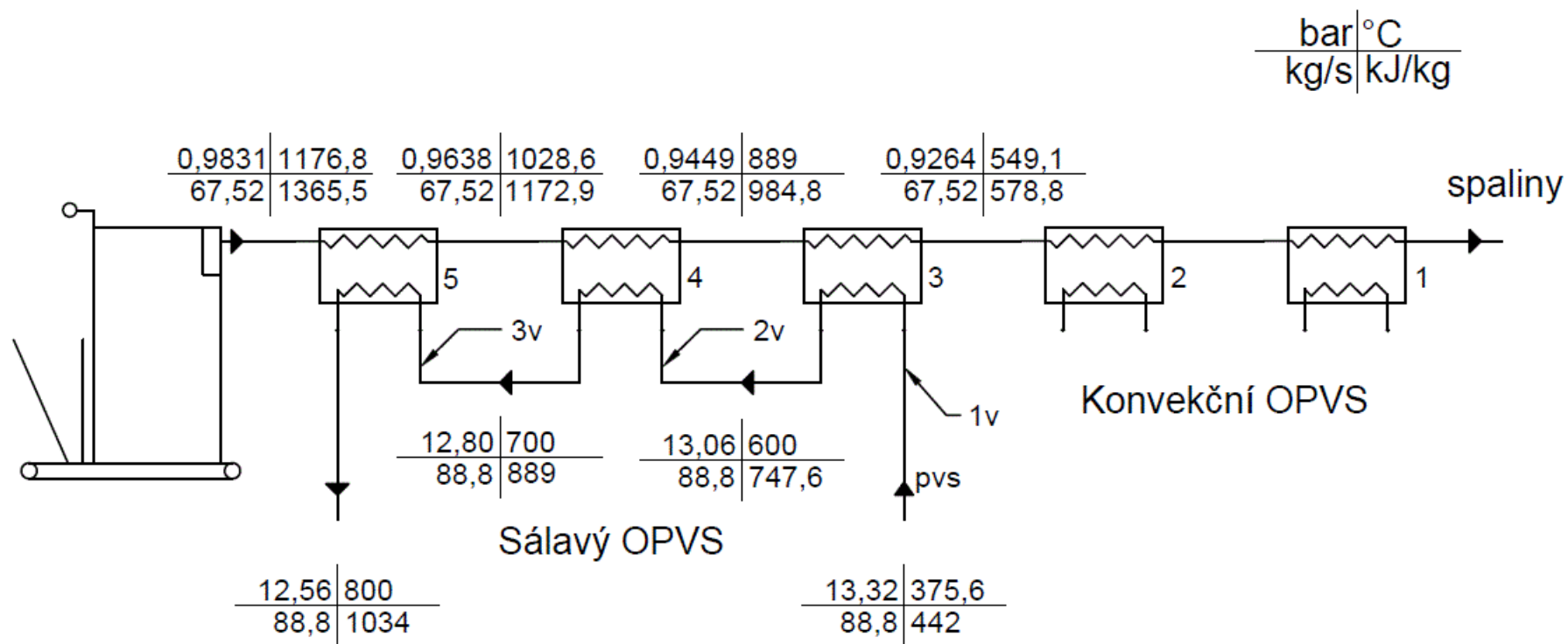


Schéma 12-1 Schéma OPVS

1

¹ Pouze informativního charakteru, schéma s vypočtenými hodnotami se nachází na str.43.

13 Fyzikální vlastnosti parovzduchové směsi

13.1 Měrná vlhkost nasávaného vzduchu

Měrná vlhkost nasávaného vzduchu byla stanovena programem EES funkcí HumRat o zadaných parametrech (teplotě, relativní vlhkosti a tlaku v barech). Po konzultaci s vedoucím diplomové práce byla teplota vzduchu stanovena $t = 25$ [°C].

$T=25$
 $rh=0,6$
 $P1=0,981$

$\omega = \text{HumRat}(\text{AirH}_2\text{O}; T=T; r=rh; P=P1)$

$$d = 0,01229 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (13 - 1)$$

13.2 Koncentrace páry ve vlhkém vzduchu

$$w_{pd} = \frac{d}{1 + d} \quad (13 - 2)$$

$$w_{pd} = \frac{0,01229}{1 + 0,01229}$$

$$w_{pd} = 0,0121 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Kde:

$$d \quad \text{Měrná vlhkost nasávaného vzduchu} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

13.3 Koncentrace vodní páry v parovzduchové směsi

$$w_{vp} = (1 - w_{pp}) \cdot w_{pd} + w_{pp} \quad (13 - 3)$$

$$w_{vp} = (1 - 0,25) \cdot 0,0121 + 0,25$$

$$w_{vp} = 0,259 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

13.4 Koncentrace suchého vzduchu v parovzduchové směsi

$$w_{sv} = 1 - w_{vp} \quad (13 - 4)$$

$$w_{sv} = 1 - 0,259$$

$$w_{sv} = 0,741 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

13.5 Parciální tlak vodní páry v parovzduchové směsi

$$p_{vp3} = p_c \cdot \left[1 - \frac{w_{sv} \cdot r_{sv}}{w_{sv} \cdot r_{sv} + w_{vp} \cdot r_{vp}} \right] \quad (13 - 5)$$

$$p_{vp3} = 13,32 \cdot \left[1 - \frac{0,741 \cdot 287,1}{0,741 \cdot 287,1 + 0,259 \cdot 461,5} \right]$$

$$p_{vp3} = 4,792 \text{ [bar]}$$

$$p_{vp4} = 4,698 \text{ [bar]}$$

$$p_{vp5} = 4,605 \text{ [bar]}$$

Kde:

p_c	Celkový tlak parovzduchové směsi	[bar]
w_{sv}	Koncentrace suchého vzduchu v parovzduchové směsi	[kg · kg ⁻¹]
w_{vp}	Koncentrace vodní páry v parovzduchové směsi	[kg · kg ⁻¹]
r_{sv}	Měrná plynová konstanta suchého vzduchu	[kJ · kg ⁻¹ · K]
r_{vp}	Měrná plynová konstanta vodní páry	[kJ · kg ⁻¹ · K]

13.6 Parciální tlak suchého vzduchu v parovzduchové směsi

$$p_{sv3} = p_c - p_{vp3} \quad (13 - 6)$$

$$p_{sv3} = 13,32 - 4,647$$

$$p_{sv3} = 8,673 \text{ [bar]}$$

$$p_{sv4} = 8,362 \text{ [bar]}$$

$$p_{sv5} = 8,165 \text{ [bar]}$$

Kde:

p_c	Celkový tlak parovzduchové směsi	[bar]
p_{vp}	Parciální tlak vodní páry v parovzduchové směsi	[bar]

13.7 Entalpie parovzduchové směsi

(Entalpie vodní páry ze zadaných parametrů je 3222 [kJ · kg⁻¹].

$$i_{sm3} = w_{sv} \cdot i_{sv} + w_{vp} \cdot i_{vp} \quad (13 - 7)$$

$$i_{sm3} = 0,741 \cdot 385,3 + 0,259 \cdot 3222$$

$$i_{sm3} = 1120 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

$$i_{sm4} = 1426 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

$$i_{sm5} = 1567 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Kde:

w_{sv}	Koncentrace suchého vzduchu v parovzduchové směsi	[kg · kg ⁻¹]
----------	---	--------------------------

w_{vp}	Koncentrace vodní páry v parovzduchové směsi	[kg · kg ⁻¹]
----------	--	--------------------------

i_{sv}	Entalpie suchého vzduchu	[kJ · kg ⁻¹]
----------	--------------------------	--------------------------

i_{vp}	Entalpie vodní páry	[kJ · kg ⁻¹]
----------	---------------------	--------------------------

13.8 Entalpie suchého vzduchu

$$i_{sv3} = i_{sv}^{t=500^{\circ}\text{C}} - i_{sv}^{t=0^{\circ}\text{C}} \quad (13 - 8)$$

$$i_{sv3} = 658,8 - 273,5$$

$$i_{sv3} = 385,3 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

$$i_{sv4} = 629,7 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

$$i_{sv5} = 742,3 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Kde:

$i_{sv}^{t=500^{\circ}\text{C}}$	Entalpie suchého vzduchu při dané teplotě	[kJ · kg ⁻¹]
----------------------------------	---	--------------------------

$i_{sv}^{t=0^{\circ}\text{C}}$	Entalpie vodní páry při dané teplotě	[kJ · kg ⁻¹]
--------------------------------	--------------------------------------	--------------------------

13.9 Hustota parovzduchové směsi při celkovém tlaku a teplotě pvs

$$\rho_{sm3} = \frac{p_{sv}}{r_{sv} \cdot T_{sm}} + \frac{p_{vp}}{r_{vp} \cdot T_{sm}} \quad (13 - 9)$$

$$\rho_{sm3} = \frac{8,673 \cdot 10^5}{287,1 \cdot 648,75} + \frac{4,647 \cdot 10^5}{461,5 \cdot 648,75}$$

$$\rho_{sm3} = 6,179 [kg \cdot m^{-3}]$$

$$\rho_{sm4} = 4,502 [kg \cdot m^{-3}]$$

$$\rho_{sm5} = 3,959 [kg \cdot m^{-3}]$$

13.10 Hustota parovzduchové směsi při normálních podmínkách

$$\rho_{sm3}^N = \rho_{sm} \cdot \frac{p_N}{p_{sm}} \cdot \frac{T_{sm}}{T_N} \quad (13 - 10)$$

$$\rho_{sm3}^N = 6,179 \cdot \frac{1,01325}{13,32} \cdot \frac{648,75}{273,15}$$

$$\rho_{sm3}^N = 1,116 [kg \cdot m_N^{-3}]$$

$$\rho_{sm4}^N = 1,116 [kg \cdot m_N^{-3}]$$

$$\rho_{sm5}^N = 1,116 [kg \cdot m_N^{-3}]$$

13.11 Tepelná vodivost parovzduchové směsi

$$\lambda_{sm3} = \frac{y_{sv} \cdot \lambda_{sv} \cdot M_{sv}^{\frac{1}{3}} + y_{vp} \cdot \lambda_{vp} \cdot M_{vp}^{\frac{1}{3}}}{y_{sv} \cdot M_{sv}^{\frac{1}{3}} + y_{vp} \cdot M_{vp}^{\frac{1}{3}}} \quad (13 - 11)$$

$$\lambda_{sm3} = \frac{0,616 \cdot 0,04767 \cdot 28,97^{1/3} + 0,3834 \cdot 0,05323 \cdot 18,02^{1/3}}{0,616 \cdot 28,97^{1/3} + 0,3834 \cdot 18,02^{1/3}}$$

$$\lambda_{sm3} = 0,05029 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$\lambda_{sm4} = 0,06776 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$\lambda_{sm5} = 0,0756 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Kde:

y_{sv}	Molární koncentrace suchého vzduchu v pvs	$[kmol \cdot kmol^{-1}]$
λ_{sv}	Tepelná vodivost suchého vzduchu	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
M_{sv}	Molární hmotnost suchého vzduchu	$[kg \cdot kmol^{-1}]$
y_{vp}	Molární koncentrace vodní páry v pvs	$[kmol \cdot kmol^{-1}]$

λ_{vp}	Tepelná vodivost vodní páry	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
M_{vp}	Molární hmotnost vodní páry	$[kg \cdot kmol^{-1}]$

13.12 Dynamická viskozita parovzduchové směsi

$$\eta_{sm3} = \frac{\eta_{vp} \cdot 10^{-6}}{1 + \Phi_{pv} \cdot \frac{y_{sv}}{y_{vp}}} + \frac{\eta_{sv} \cdot 10^{-6}}{1 + \Phi_{vp} \cdot \frac{y_{vp}}{y_{sv}}} \quad (13 - 12)$$

$$\eta_{sm3} = \frac{23,38 \cdot 10^{-6}}{1 + 1,072 \cdot \frac{0,616}{0,3834}} + \frac{31,83 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,9077 \cdot \frac{0,3834}{0,616}}$$

$$\eta_{sm3} = 28,93 \cdot 10^{-6} [Pa \cdot s]$$

$$\eta_{sm4} = 36,66 \cdot 10^{-6} [Pa \cdot s]$$

$$\eta_{sm5} = 39,8 \cdot 10^{-6} [Pa \cdot s]$$

$$\Phi_{pv3} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\eta_{vp}}{\eta_{sv}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{M_{sv}}{M_{vp}} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{M_{vp}}{M_{sv}} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (13 - 13)$$

$$\Phi_{pv3} = \frac{\left[1 + \left(\frac{23,38 \cdot 10^{-6}}{31,83 \cdot 10^{-6}} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{28,97}{18,02} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{18,02}{28,97} \right)^{1/2}}$$

$$\Phi_{pv3} = 1,072$$

$$\Phi_{pv4} = 1,153$$

$$\Phi_{pv5} = 1,181$$

$$\Phi_{vp3} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\eta_{sv}}{\eta_{vp}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{M_{vp}}{M_{sv}} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{M_{sv}}{M_{vp}} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (13 - 14)$$

$$\Phi_{vp3} = \frac{\left[1 + \left(\frac{31,83 \cdot 10^{-6}}{23,38 \cdot 10^{-6}} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{28,97}{18,02} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{28,97}{18,02} \right)^{1/2}}$$

$$\Phi_{vp3} = 0,9077$$

$$\Phi_{vp4} = 0,8442$$

$$\Phi_{vp5} = 0,825$$

13.13 Kinematická viskozita

$$\nu_{sm3} = \frac{\eta_{sm}}{\rho_{sm}} \quad (13 - 15)$$

$$\nu_{sm3} = \frac{28,93 \cdot 10^{-6}}{6,179}$$

$$\nu_{sm3} = 4,681 \cdot 10^{-6} [m^2 \cdot s^{-1}]$$

$$\nu_{sm4} = 8,144 \cdot 10^{-6} [m^2 \cdot s^{-1}]$$

$$\nu_{sm5} = 1,005 \cdot 10^{-5} [m^2 \cdot s^{-1}]$$

13.14 Objemový průtok PVS za normálních podmínek

$$V_{PVS}^{obj} = \frac{\dot{m}_{PVS}}{\rho_{sm3}^N} \quad (13 - 16)$$

$$V_{PVS}^{obj} = \frac{88,8}{1,116}$$

$$V_{PVS}^{obj} = 79,56 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Kde:

\dot{m}_{PVS} Hmotnostní tok PVS $[kg \cdot s^{-1}]$

ρ_{sm3}^N Hustota parovzduchové směsi při normálních podmínkách $[kg \cdot m_N^{-3}]$

13.15 Objemový průtok spalin při teplotě PVS $t = 375,6$ [°C]

$$\frac{V_{PVS}^{obj}}{T_1} = \frac{V_{PVS}^{t=375,6}}{T_2} \quad (13 - 17)$$

$$V_{PVS}^{obj} \cdot T_2 = V_{PVS}^{t=375,6} \cdot T_1$$

$$79,56 \cdot (273,15 + 375,6) = V_{PVS}^{t=375,6} \cdot 273,15$$

$$V_{PVS}^{t=375,6} = \frac{79,56 \cdot (273,15 + 375,6)}{273,15}$$

$$V_{PVS}^{t=375,6} = 188,96 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

14 Výrobní teplo OPVS

$$Q_{VÝR}^{OPVS} = \dot{m}_{PVS} \cdot (i_{800} - i_{375,6}) \quad (14 - 1)$$

$$Q_{VÝR}^{OPVS} = 88,8 \cdot (1034 - 442)$$

$$Q_{VÝR}^{OPVS} = 52569,6 [kJ \cdot s^{-1}]$$

Kde:

\dot{m}_{PVS}	Hmotnostní tok PVS	$[kg \cdot s^{-1}]$
-----------------	--------------------	---------------------

i_{800}	Entalpie PVS při teplotě 800 °C	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
-----------	---------------------------------	----------------------

$i_{375,6}$	Entalpie PVS při teplotě 375,6 °C	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
-------------	-----------------------------------	----------------------

15 Entalpie spalin při teplotě $t_{SP} = 1176,8$ [°C] a tlaku $p = 0,98$ [bar]

15.1 Hustota složek spalin při dané teplotě a tlaku

Tyto hodnoty byly vypočteny softwarem EES

$$\rho_{CO_2} = 0,3598 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

$$\rho_{SO_2} = 0,5224 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

$$\rho_{N_2} = 0,2284 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

$$\rho_{O_2} = 0,2609 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

$$\rho_{H_2O} = 0,1469 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

15.2 Stanovení dílčích podílů jednotlivých složek spalin

$$\frac{\rho_{CO_2}}{\rho_{SPAL}^{t_{SP}}} = \frac{0,3598}{0,2478} = 1,4519 \text{ [-]} \quad (15 - 1)$$

$$\frac{\rho_{SO_2}}{\rho_{SPAL}^{t_{SP}}} = \frac{0,5224}{0,2478} = 2,1082 \text{ [-]} \quad (15 - 2)$$

$$\frac{\rho_{N_2}}{\rho_{SPAL}^{t_{SP}}} = \frac{0,2284}{0,2478} = 0,9217 \text{ [-]} \quad (15 - 3)$$

$$\frac{\rho_{O_2}}{\rho_{SPAL}^{t_{SP}}} = \frac{0,2609}{0,2478} = 1,0528 \text{ [-]} \quad (15 - 4)$$

$$\frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{SPAL}^{t_{SP}}} = \frac{0,1469}{0,2478} = 0,5928 \text{ [-]} \quad (15 - 5)$$

15.3 Hmotnostní podíl jednotlivých složek spalin

$$m_{CO_2} = \frac{\rho_{CO_2}}{\rho_{SPAL}^{t_{SP}}} \cdot \omega_{CO_2} = 1,4519 \cdot 0,131 = 0,1902 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]} \quad (15 - 6)$$

$$m_{SO_2} = \frac{\rho_{SO_2}}{\rho_{SPAL}^{t_{SP}}} \cdot \omega_{SO_2} = 2,1082 \cdot 0,00029 = 0,000611 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]} \quad (15 - 7)$$

$$m_{N_2} = \frac{\rho_{N_2}}{\rho_{SPAL}^{t_{SP}}} \cdot \omega_{N_2} = 0,9217 \cdot 0,7424 = 0,68427 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]} \quad (15 - 8)$$

$$m_{O_2} = \frac{\rho_{O_2}}{\rho_{SPAL}^{t_{SP}}} \cdot \omega_{O_2} = 1,0528 \cdot 0,0624 = 0,06569 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]} \quad (15 - 9)$$

$$m_{H_2O} = \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{SPAL}^{t_{SP}}} \cdot \omega_{H_2O} = 0,5928 \cdot 0,0634 = 0,03758 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]} \quad (15 - 10)$$

15.4 Entalpie složek spalín při dané teplotě

Tyto hodnoty byly vypočteny softwarem EES

$$i_{CO_2} = 1339 [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$i_{SO_2} = 929,4 [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$i_{N_2} = 1313 [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$i_{O_2} = 1215 [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$i_{H_2O} = 2555 [kJ \cdot kg^{-1}]$$

15.5 Celková entalpie spalín na kg spalín

$$i_{SP}^{t_{sp}} = i_{CO_2} \cdot m_{CO_2} + i_{SO_2} \cdot m_{SO_2} + i_{N_2} \cdot m_{N_2} + i_{O_2} \cdot m_{O_2} + i_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \quad (15 - 11)$$

$$i_{SP}^{t_{sp}} = 254,6778 + 0,56786 + 898,4465 + 79,81 + 96,0169$$

$$i_{SP}^{t_{sp}} = 1330 [kJ \cdot kg_{SP}^{-1}]$$

16 Výkon a výrobní teplo výměníků

16.1 Výkon výměníků na straně PVS

$$P_{P5}^{PVS} = \dot{m}_{PVS} \cdot i_{PVS}^{t=800} \quad (16 - 1)$$

$$P_{P5}^{PVS} = 88,8 \cdot 1034$$

$$P_{P5}^{PVS} = 91819,2 [kW]$$

$$P_{P3}^{PVS} = \dot{m}_{PVS} \cdot i_{PVS}^{t=357,6} \quad (16 - 2)$$

$$P_{P3}^{PVS} = 88,8 \cdot 442$$

$$P_{P3}^{PVS} = 39249,6 [kW]$$

$$P_{P5-P3}^{PVS} = P_{P5}^{PVS} - P_{P3}^{PVS} \quad (16 - 3)$$

$$P_{P5-P3}^{PVS} = 91819,2 - 39249,6$$

$$P_{P5-P3}^{PVS} = 52569,6 [kW]$$

16.2 Výrobní teplo výměníků na straně PVS

$$Q_3^{PVS} = \dot{m}_{PVS} \cdot (i_{PVS}^{t=600} - i_{PVS}^{t=375,6}) \quad (16 - 4)$$

$$Q_3^{PVS} = 88,8 \cdot (747,6 - 442)$$

$$Q_3^{PVS} = 27137,28 [kJ \cdot s^{-1}]$$

$$Q_4^{PVS} = \dot{m}_{PVS} \cdot (i_{PVS}^{t=700} - i_{PVS}^{t=600}) \quad (16 - 5)$$

$$Q_4^{PVS} = 88,8 \cdot (889 - 747,6)$$

$$Q_4^{PVS} = 12556,32 [kJ \cdot s^{-1}]$$

$$Q_5^{PVS} = \dot{m}_{PVS} \cdot (i_{PVS}^{t=800} - i_{PVS}^{t=700}) \quad (16 - 6)$$

$$Q_5^{PVS} = 88,8 \cdot (1034 - 889)$$

$$Q_5^{PVS} = 12876 [kJ \cdot s^{-1}]$$

Kontrola ΣQ

$$P_{P5-P3}^{PVS} = Q_3^{PVS} + Q_4^{PVS} + Q_5^{PVS} \quad (16 - 7)$$

$$52569,6 = 27137,28 + 12556,32 + 12876$$

$$52569,6 = 52569,6$$

Je v souladu.

17 Výpočet entalpie spalin vstupního dílu ohříváku

$$i_{SP} = \frac{P_{P5-P3}^{PVS}}{\dot{m}_{SP}} \quad (17 - 1)$$

$$i_{SP} = \frac{52569,6}{69,6}$$

$$i_{SP} = 755,3 [kJ \cdot kg^{-1}]$$

18 Návrh ohříváku parovzduchové směsi

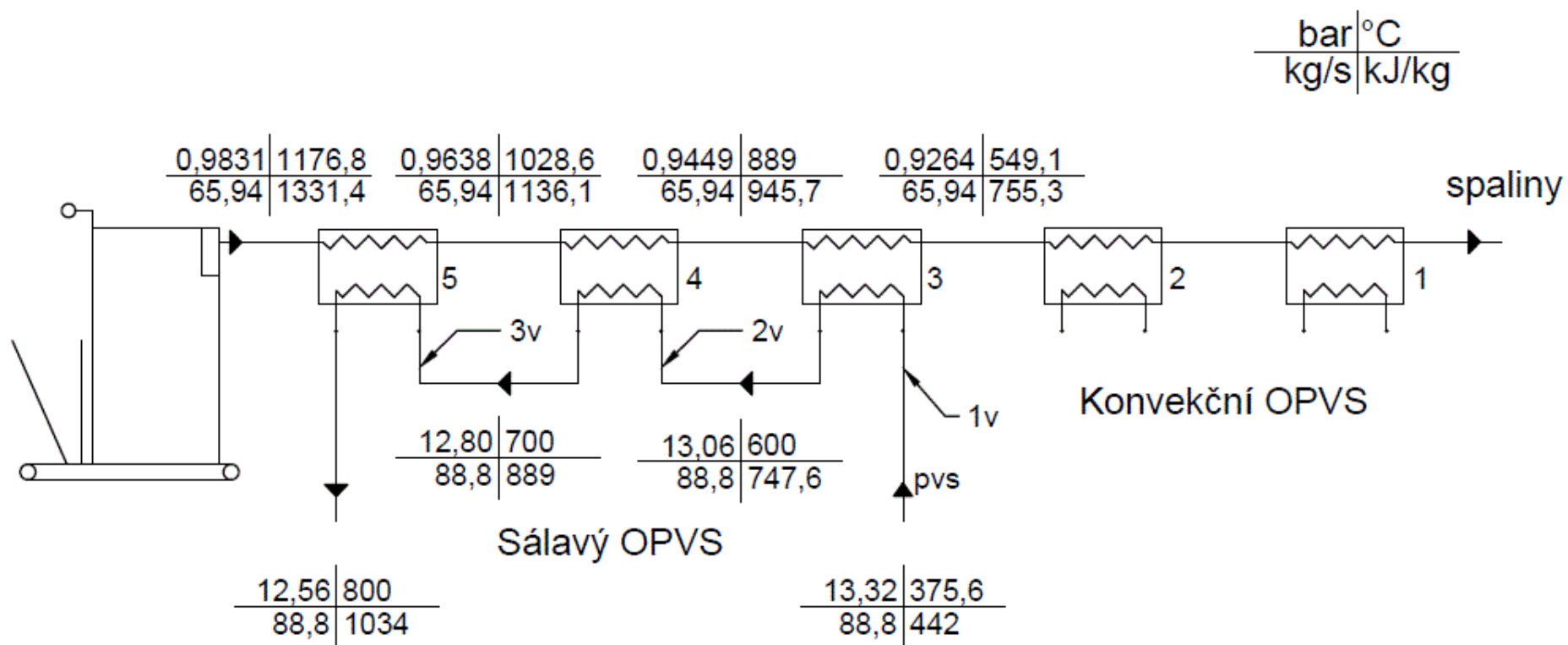


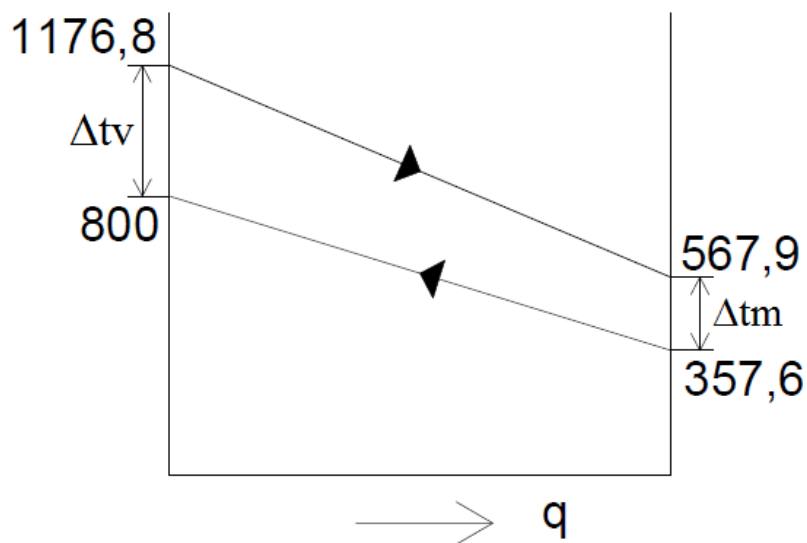
Schéma 18-1 Výpočtové schéma OPVS

2

² Výpočtové schéma s dopočítanými hodnotami potřebnými k výpočtu OPVS

18.1 Střední logaritmický teplotní spád protiproudu

Dále bude detailně prošetřován jen výstupní díl OPVS.



Obrázek 18-1 Teplotní spád protiproudého zapojení

$$\Delta t_v = 1176,8 - 800 \quad (18 - 1)$$

$$\Delta t_v = 376,8 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_m = 567,9 - 357,6 \quad (18 - 2)$$

$$\Delta t_m = 210,3 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

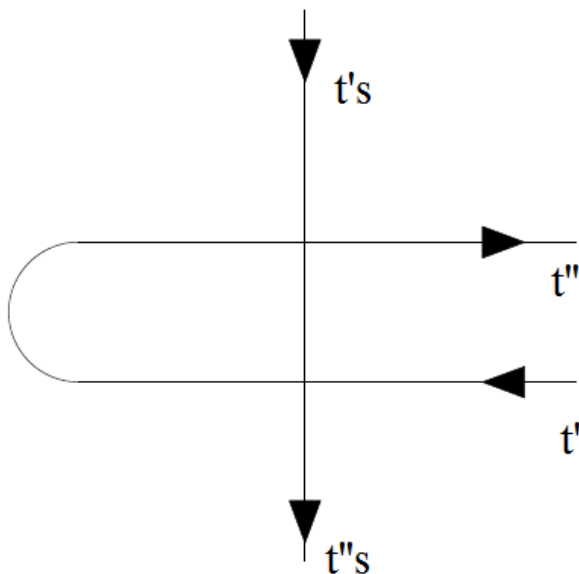
$$\Delta t_{PR} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} \quad (18 - 3)$$

$$\Delta t_{PR} = \frac{376,8 - 210,3}{\ln \frac{376,8}{210,3}}$$

$$\Delta t_{PR} = 285,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

18.2 Součinitel Ψ pro výměníky s křížovým zapojením

Pomocí literatury [1] na str.129 byl součinitel Ψ stanoven na hodnotu 0,9.



Obrázek 18-2 Protiproudé zapojení

$$\Psi = 0,9 [-]$$

18.3 Teplotní spád

$$\Delta t = \Psi \cdot \Delta t_{PR} \quad (18 - 4)$$

$$\Delta t = 0,9 \cdot 285,5$$

$$\Delta t = 256,95 [^{\circ}C]$$

Kde:

Ψ Součinitel pro výměníky s křížovým zapojením $[-]$

Δt_{PR} Střední logaritmický spád protiproudu $[^{\circ}C]$

18.4 Výpočet základních parametrů ohříváku č. 3

Po dohodě s vedoucím diplomové práce byl spočten jen výstupní díl ohříváku parovzduchové směsi (ohřívák č. 5), další teplosměnné plochy by byly spočteny stejným způsobem. Byla zvolena velikost trubek $d_4 \text{ } \varnothing 60,3 \times 2,9$ při průtoku parovzduchové směsi $\dot{m}_{pVS} = 88,8 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}]$. Pro ohřívák č. 3 jsou stanoveny jen základní parametry.

Velikost trubky	Vnitřní průřez $f \text{ [m}^2\text{]}$	Rychlosti $\omega \text{ [m/s]}$	Průtočná plocha $S \text{ [m}^2\text{]}$	Počet $n \text{ [-]}$
$d_1 \text{ } \varnothing 33,7 \times 2,3$	0,0006647	$\omega_1=14$	1,026	1544
		$\omega_2=16$	0,8981	1351
$d_2 \text{ } \varnothing 42,4 \times 2,6$	0,001086	$\omega_1=14$	1,026	945
		$\omega_2=16$	0,8981	827
$d_3 \text{ } \varnothing 48,3 \times 2,6$	0,0014582	$\omega_1=14$	1,026	704
		$\omega_2=16$	0,8981	616
$d_4 \text{ } \varnothing 60,3 \times 2,9$	0,0023316	$\omega_1=14$	1,026	440
		$\omega_2=16$	0,8981	385

Tabulka 18-1 Výpočet parametrů ohříváku č. 3

Vnitřní průřez

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (18 - 5)$$

$$f = \frac{\pi \cdot [60,3 - (2 \cdot 2,9)]^2}{4}$$

$$f = 0,0023316 \text{ [m}^2\text{]}$$

Průtočná plocha

$$S_1 = \frac{\frac{\dot{m}_{pVS}}{\rho_{sm3}}}{\omega_1} \quad (18 - 6)$$

$$S_1 = \frac{\frac{88,8}{6,179}}{14}$$

$$S_1 = 1,026 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$S_2 = \frac{\dot{m}_{PVS}}{\frac{\rho_{sm3}}{\omega_2}} \quad (18 - 7)$$

$$S_2 = \frac{88,8}{6,179}$$

$$S_2 = 0,9891 [m^2]$$

Kde:

\dot{m}_{PVS} Hmotnostní tok PVS $[kg \cdot s^{-1}]$

ρ_{sm3} Hustota PVS ve 3. ohříváku $[kg \cdot m^{-3}]$

ω_1, ω_2 Rychlost proudění média $[m \cdot s^{-1}]$

Počet trubek

$$n_1 = \frac{S_1}{f} \quad (18 - 8)$$

$$n_1 = \frac{1,026}{0,0023316}$$

$$n_1 = 440 [-]$$

$$n_2 = \frac{S_2}{f} \quad (18 - 9)$$

$$n_2 = \frac{0,8981}{0,0023316}$$

$$n_2 = 385 [-]$$

Kde:

n_1, n_2 Počet trubek $[-]$

S_1, S_2 Průtočná plocha $[m^2]$

f Vnitřní průřez $[m^2]$

18.5 Výpočet základních parametrů ohříváku č. 4

Po dohodě s vedoucím diplomové práce byl spočten jen výstupní díl ohříváku parovzduchové směsi (ohřívák č. 5), další teplosměnné plochy by byly spočteny stejným způsobem. Byla zvolena velikost trubek $d_4 \text{ } \varnothing 60,3 \times 2,9$ při průtoku parovzduchové směsi $\dot{m}_{pVS} = 88,8 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}]$. Pro ohřívák č. 4 jsou stanoveny jen základní parametry.

Velikost trubky	Vnitřní průřez $f \text{ [m}^2\text{]}$	Rychlosti $\omega \text{ [m/s]}$	Průtočná plocha $S \text{ [m}^2\text{]}$	Počet $n \text{ [-]}$
$d_1 \text{ } \varnothing 33,7 \times 2,3$	0,0006647	$\omega 1=14$	1,4089	2119
		$\omega 2=16$	1,2328	1855
$d_2 \text{ } \varnothing 42,4 \times 2,6$	0,001086	$\omega 1=14$	1,4089	1297
		$\omega 2=16$	1,2328	1135
$d_3 \text{ } \varnothing 48,3 \times 2,6$	0,0014582	$\omega 1=14$	1,4089	966
		$\omega 2=16$	1,2328	846
$d_4 \text{ } \varnothing 60,3 \times 2,9$	0,0023316	$\omega 1=14$	1,4089	604
		$\omega 2=16$	1,2328	529

Tabulka 18-2 Výpočet parametrů ohříváku č. 4

Vnitřní průřez

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (18 - 10)$$

$$f = \frac{\pi \cdot [60,3 - (2 \cdot 2,9)]^2}{4}$$

$$f = 0,0023316 \text{ [m}^2\text{]}$$

Průtočná plocha

$$S_1 = \frac{\frac{\dot{m}_{pVS}}{\rho_{sm4}}}{\omega_1} \quad (18 - 11)$$

$$S_1 = \frac{\frac{88,8}{4,502}}{14}$$

$$S_1 = 1,4089 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$S_2 = \frac{\dot{m}_{PVS}}{\frac{\rho_{sm4}}{\omega_2}} \quad (18 - 12)$$

$$S_2 = \frac{88,8}{\frac{4,502}{16}}$$

$$S_2 = 1,2328 [m^2]$$

Kde:

$$\dot{m}_{PVS} \quad \text{Hmotnostní tok PVS} \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

$$\rho_{sm3} \quad \text{Hustota PVS ve 3. ohříváku} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$$\omega_1, \omega_2 \quad \text{Rychlost proudění média} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Počet trubek

$$n_1 = \frac{S_1}{f} \quad (18 - 13)$$

$$n_1 = \frac{1,4089}{0,0023316}$$

$$n_1 = 604 [-]$$

$$n_2 = \frac{S_2}{f} \quad (18 - 14)$$

$$n_2 = \frac{1,2328}{0,0023316}$$

$$n_2 = 529 [-]$$

Kde:

$$n_1, n_2 \quad \text{Počet trubek} \quad [-]$$

$$S_1, S_2 \quad \text{Průtočná plocha} \quad [m^2]$$

$$f \quad \text{Vnitřní průřez} \quad [m^2]$$

18.6 Výpočet základních parametrů ohříváku č. 5

Po dohodě s vedoucím diplomové práce byl spočten jen výstupní díl ohříváku parovzduchové směsi. Ostatní části by byly počítány stejným způsobem. Pro ohřívák č. 5 byla zvolena velikost trubek $d_4 \text{ } \varnothing 60,3 \times 2,9$ při průtoku parovzduchové směsi $\dot{m}_{pVS} = 88,8 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$.

Velikost trubky	Vnitřní průřez $f \text{ [m}^2\text{]}$	Rychlosti $\omega \text{ [m/s]}$	Průtočná plocha $S \text{ [m}^2\text{]}$	Počet $n \text{ [-]}$
$d_1 \text{ } \varnothing 33,7 \times 2,3$	0,0006647	$\omega 1=14$	1,602	2410
		$\omega 2=16$	1,401	2108
$d_2 \text{ } \varnothing 42,4 \times 2,6$	0,001086	$\omega 1=14$	1,602	1475
		$\omega 2=16$	1,401	1290
$d_3 \text{ } \varnothing 48,3 \times 2,6$	0,0014582	$\omega 1=14$	1,602	1099
		$\omega 2=16$	1,401	961
$d_4 \text{ } \varnothing 60,3 \times 2,9$	0,0023316	$\omega 1=14$	1,602	687
		$\omega 2=16$	1,401	600

Tabulka 18-3 Výpočet parametrů ohříváku č. 5

Vnitřní průřez

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (18 - 15)$$

$$f = \frac{\pi \cdot [60,3 - (2 \cdot 2,9)]^2}{4}$$

$$f = 0,0023316 \text{ [m}^2\text{]}$$

Průtočná plocha

$$S_1 = \frac{\dot{m}_{pVS}}{\rho_{sm5} \cdot \omega_1} \quad (18 - 16)$$

$$S_1 = \frac{88,8}{3,959 \cdot 14}$$

$$S_1 = 1,602 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$S_2 = \frac{\dot{m}_{PVS}}{\frac{\rho_{sm5}}{\omega_2}} \quad (18 - 17)$$

$$S_2 = \frac{88,8}{\frac{3,959}{16}}$$

$$S_2 = 1,401 [m^2]$$

Kde:

\dot{m}_{PVS} Hmotnostní tok PVS $[kg \cdot s^{-1}]$

ρ_{sm3} Hustota PVS ve 3. ohříváku $[kg \cdot m^{-3}]$

ω_1, ω_2 Rychlost proudění média $[m \cdot s^{-1}]$

Počet trubek

$$n_1 = \frac{S_1}{f} \quad (18 - 18)$$

$$n_1 = \frac{1,602}{0,0023316}$$

$$n_1 = 687 [-]$$

$$n_2 = \frac{S_2}{f} \quad (18 - 19)$$

$$n_2 = \frac{1,401}{0,0023316}$$

$$n_2 = 600 [-]$$

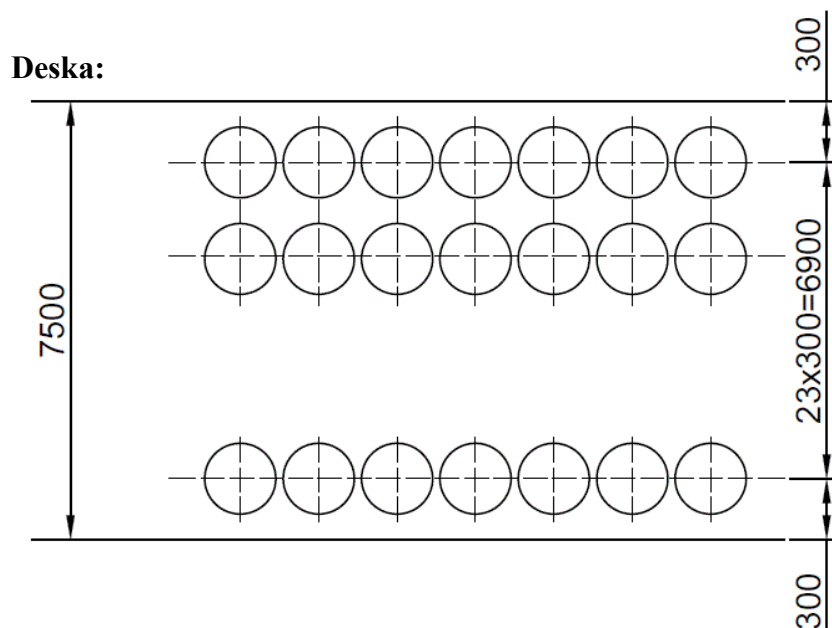
Kde:

n_1, n_2 Počet trubek $[-]$

S_1, S_2 Průtočná plocha $[m^2]$

f Vnitřní průřez $[m^2]$

19 Návrh výstupního dílu OPVS č.5



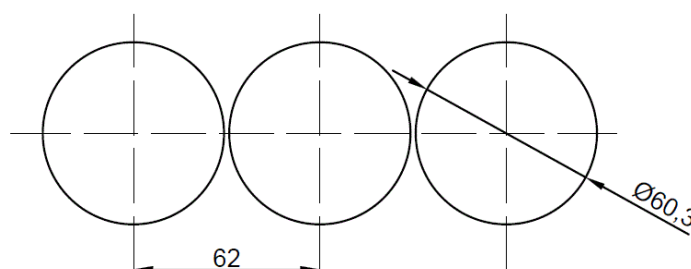
Počet desek: 24

Počet trubek: 25

Celkový počet trubek: $25 \cdot 24 = 600$

Šířka desky:

$$5 \cdot 62 + 60,3 = 1610 \text{ [mm]}$$



19.1 Střední měrná tepelná kapacita PVS

$$c_{p5} = \frac{i_{PVS}^{t=800} - i_{PVS}^{t=700}}{T_{PVS}^{Výst} - T_{PVS}^{Vst}} \quad (19 - 1)$$

$$c_{p5} = \frac{1034 - 889}{1073,15 - 973,15}$$

$$c_{p5} = 1,45 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Kde:

$i_{PVS}^{t=800}$ Entalpie na výstupu $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$

$i_{PVS}^{t=700}$ Entalpie na vstupu $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$

$T_{PVS}^{Výst}$ Teplota na výstupu $[K]$

T_{PVS}^{Vst} Teplota na vstupu $[K]$

19.2 Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\eta_{sm5} \cdot c_{p5} \cdot \rho_{sm5}}{\lambda_{sm5}} \quad (19 - 2)$$

$$Pr = \frac{39,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,45 \cdot 10^3 \cdot 3,959}{0,075}$$

$$Pr = 3,046 [-]$$

Kde:

η_{sm5}	Dynamická viskozita PVS	$[Pa \cdot s]$
ρ_{sm5}	Hustota PVS	$[kg \cdot m^{-3}]$
λ_{sm5}	Tepelná vodivost PVS	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
c_{p5}	Střední měrná tepelná kapacita	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

19.3 Přestup tepla konvekcí

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sm5}}{d_4} \cdot \left(\frac{\omega_2 \cdot d_4}{\nu_{sm5}} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (19 - 3)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,075}{54,5 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{16 \cdot 54,5 \cdot 10^{-3}}{1,005 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 3,046^{0,4}$$

$$\alpha_p = 440,755 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Kde:

η_{sm5}	Dynamická viskozita PVS	$[Pa \cdot s]$
ρ_{sm5}	Hustota PVS	$[kg \cdot m^{-3}]$
λ_{sm5}	Tepelná vodivost PVS	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
ν_{sm5}	Kinematická viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
Pr	Prandtlovo číslo	$[-]$
d_4	Vnitřní průměr trubky	$[m]$
ω_2	Rychlosti proudění	$[m \cdot s^{-1}]$

19.4 Teplota povrchu nánosů na straně spalín

Součinitel zanesení teplosměnné plochy ε byl stanoven dle literatury [1] na hodnotu $\varepsilon = 0,008 [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$; tepelné zatížení $\frac{Q+Q_{sal}}{S}$ bylo stanoveno dle literatury [1] na hodnotu $\frac{Q+Q_{sal}}{S} = 10 [kW \cdot m^{-2}]$

$$t_z = t_{stř5} \cdot \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \frac{Q + Q_{sal}}{S} \cdot 10^3 \quad (19 - 4)$$

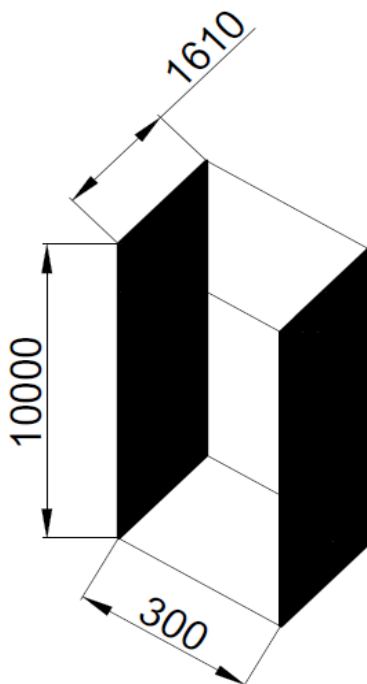
$$t_z = \frac{800 - 700}{2} \cdot \left(0,008 + \frac{1}{440,755} \right) \cdot 10 \cdot 10^3$$

$$t_z = 852,7 [^{\circ}C]$$

Kde:

$t_{stř5}$	Střední teplota PVS	[$^{\circ}C$]
ε	Součinitel zanesení teplosměnné plochy	[$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$]
α_p	Přestup tepla konvekci	[$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
$\frac{Q+Q_{sal}}{S}$	Tepelné zatížení	[$kW \cdot m^{-2}$]

19.5 Efektivní tloušťka sálové vrstvy



Obrázek 19-1 Velikosti prostoru mezi deskami

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{A} + \frac{1}{B} + \frac{1}{C}} \quad (19 - 5)$$

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{10} + \frac{1}{1,61} + \frac{1}{0,3}}$$

$$s = 0,444 [m]$$

Kde:

A Výška prostoru mezi deskami $[m]$

B Šířka prostoru mezi deskami $[m]$

C Hloubka prostoru mezi deskami $[m]$

19.6 Objemová koncentrace vodní páry ve spalínách

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{SPV}} \quad (19 - 6)$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,5394}{8,4995}$$

$$r_{H_2O} = 0,0635 [-]$$

Kde:

V_{H_2O} Objem vodní páry $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$

V_{SPV} Objem vlhkých spalin $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$

19.7 Objemová koncentrace kyslíku ve spalínách

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{SPV}} \quad (19 - 7)$$

$$r_{O_2} = \frac{0,5310}{8,4995}$$

$$r_{O_2} = 0,0625 [-]$$

Kde:

V_{O_2} Objem kyslíku $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$

V_{SPV} Objem vlhkých spalin $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$

19.8 Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalínách

$$r_s = r_{H_2O} + r_{O_2} \quad (19 - 8)$$

$$r_s = 0,0635 + 0,0625$$

$$r_s = 0,126 [-]$$

Kde:

$$r_{H_2O} \quad \text{Objemová koncentrace vodní páry ve spalínách} \quad [-]$$

$$r_{O_2} \quad \text{Objemová koncentrace kyslíku ve spalínách} \quad [-]$$

19.9 Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalínách

$$p_s = r_s \cdot \frac{(p_{SP}^{Vst} - p_{SP}^{Výst})}{2} \quad (19 - 9)$$

$$p_s = 0,126 \cdot \frac{0,09831 + 0,09638}{2}$$

$$p_s = 0,01226 [MPa]$$

Kde:

$$r_s \quad \text{Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalínách} \quad [-]$$

$$p_{SP}^{Vst} \quad \text{Vstupní tlak spalin} \quad [MPa]$$

$$p_{SP}^{Výst} \quad \text{Výstupní tlak spalin} \quad [MPa]$$

19.10 Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{SP}^{stř} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s \quad (19 - 10)$$

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,0635}{3,16 \cdot \sqrt{0,01226 \cdot 0,444}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1104,4 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,126$$

$$k_s \cdot r_s = 2,241 [-]$$

Kde:

r_{H_2O}	Objemová koncentrace vodní páry ve spalínách	$[-]$
s	Efektivní tloušťka sálavé vrstvy	$[m]$
t_z	Teplota povrchu nánosu na straně spalín	$[^{\circ}C]$
p_s	Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalínách	$[MPa]$
r_s	Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalínách	$[-]$

19.11 Hmotnost spalín

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_{ok} \cdot V_{VZV_{min}} \quad (19 - 11)$$

$$G_s = 1 - 0,2204 + 1,306 \cdot 1,3 \cdot 0,063220$$

$$G_s = 0,67 [kg \cdot kg^{-1}]$$

Kde:

A^r	Obsah popela v palivu	$[\%]$
α_{ok}	Přebytek vzduchu ve spalovací komoře	$[-]$
$V_{VZV_{min}}$	Minimální objem vlhkého vzduchu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$

19.12 Koncentrace popela ve spalínách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_{pop} + 1)}{2 \cdot G_S} \quad (19 - 12)$$

$$\mu_{pk} = \frac{0,2204 \cdot (0,35 + 1)}{2 \cdot 0,67}$$

$$\mu_{pk} = 0,222 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Kde:

A^r	Obsah popela v palivu	[%]
X_{POP}	Množství popela odváděného jako popílek	[%]
G_S	Hmotnost spalin	[kg · kg ⁻¹]

19.13 oučinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{SP}^{stř} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} \quad (19 - 13)$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,222}{\sqrt[3]{(1104,4 + 273,15)^2 \cdot 16^2}}$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = 16,09 \text{ [-]}$$

Kde:

μ_{pk}	Koncentrace popela ve spalínách	[kg · kg ⁻¹]
$t_{SP}^{stř}$	Střední teplota spalin	[°C]
d_{pk}	Střední efektivní průměr částic popílku	[μm]

19.14 Exponent stupně černosti spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot \frac{(p_{SP}^{Vst} - p_{SP}^{Výst})}{2} \cdot s \quad (19 - 14)$$

$$k \cdot p \cdot s = (2,241 + 16,09) \cdot 0,097345 \cdot 0,366$$

$$k \cdot p \cdot s = 0,653 [-]$$

Kde:

$$k_s \cdot r_s \quad \text{Koncentrace popela ve spalinách} \quad [-]$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} \quad \text{Střední teplota spalin} \quad [-]$$

$$\frac{(p_{SP}^{Vst} - p_{SP}^{Výst})}{2} \quad \text{Střední tlak spalin} \quad [MPa]$$

$$s \quad \text{Efektivní tloušťka sálové vrstvy} \quad [m]$$

19.15 Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad (19 - 15)$$

$$a = 1 - e^{-0,653}$$

$$a = 0,48 [-]$$

Kde:

$$k \cdot p \cdot s \quad \text{Exponent stupně černosti spalin} \quad [-]$$

19.16 Součinitel přestupu tepla sálaním

Nomogramový součinitel α_N byl stanoven dle literatury [1] za pomoci teploty spalin a teploty povrchu nánosů na straně spalin. $\alpha_N = 450 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$

$$\alpha_{sal} = a \cdot \alpha_N \quad (19 - 16)$$

$$\alpha_{sal} = 0,48 \cdot 450$$

$$\alpha_{sal} = 215,8 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Kde:

$$a \quad \text{Stupeň černosti proudu spalin} \quad [-]$$

$$\alpha_N \quad \text{Nomogramový součinitel} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

19.17 Součinitel prostupu tepla

Součinitel zanesení ε byl stanoven dle literatury [1].

$$\varepsilon = 0,008 [m^2 \cdot K^{-1} \cdot W]$$

$$k = \frac{\alpha_{sal}}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \alpha_{sal}} \quad (19 - 17)$$

$$k = \frac{215,8}{1 + \left(0,008 + \frac{1}{440,755} \right) \cdot 215,8}$$

$$k = 67,1 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Kde:

α_{sal}	Součinitel přestupu tepla sáláním	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
α_p	Přestup tepla konvekci	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
ε	Součinitel zanesení	$[m^2 \cdot K^{-1} \cdot W^{-1}]$

19.18 Výhřevná plocha ohříváku

$$S = \frac{Q_5^{SP}}{k \cdot \Delta t \cdot 10^{-3}} \quad (19 - 18)$$

$$S = \frac{\dot{m}_{SP} \cdot (i_{SP}^{t=1176,8} - i_{SP}^{t=1032})}{67,1 \cdot 256,95 \cdot 10^{-3}}$$

$$S = \frac{65,94 \cdot (1331,4 - 1136,1)}{67,1 \cdot 256,95 \cdot 10^{-3}}$$

$$S = \frac{12882,96}{68,61 \cdot 256,95 \cdot 10^{-3}}$$

$$S = 746,93 [m^2]$$

Kde:

Q_5^{SP}	Tepelný výkon na straně spalin	$[kW]$
k	Součinitel prostupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
Δt	Teplotní spád	$[^{\circ}C]$

19.19 Výhřevná plocha jedné desky

$$S_1^{výhř} = \frac{S}{n} \quad (19 - 19)$$

$$S_1^{výhř} = \frac{746,93}{24}$$

$$S_1^{výhř} = 31,12 [m^2]$$

Kde:

S Výhřevná plocha ohříváku $[m^2]$

n Počet desek $[-]$

19.20 Výška desky

$$a_{desky} = \frac{S_1^{výhř}}{2 \cdot b_{desky}} \quad (19 - 20)$$

$$a_{desky} = \frac{31,12}{2 \cdot 1,61}$$

$$a_{desky} \doteq 10 [m]$$

Výsledná výška je v souladu s předpokládanou výškou desky 10 metrů.

Kde:

$S_1^{výhř}$ Výhřevná plocha jedné desky $[m^2]$

b_{desky} Šířka desky $[m]$

20 Plán kontrol a zkoušek

Plán kontrol a zkoušek slouží k přehledu všech operací při výrobě a montáži, které mají být protokolovány (jsou-li odsouhlaseny odběratelem a ten si určí, u kterého kontrolního bodu bude zúčastněn a to body H a W, na které musí být vyzván a aby mohla dál pokračovat výroba), popřípadě zdokumentovány výrobcem a zároveň odsouhlasují kontrolní body odběratelem, při kterých se provádí kontrola viz. bod H a W. Tyto body jsou následně kontrolovány při kontrole a ztvrzeny podpisem v Plánu kontrol a zkoušek. Tento doklad se předává současně s průvodní technickou dokumentací odběrateli.

Plán kontrol a zkoušek vytváří zhotovitel na základě vzoru od odběratele a popisuje veškerý sled technologických a administrativních operací, které se budou při výrobě nebo montáži uskutečňovat, toto se následně doplní kontrolními body.

		PLÁN KONTROL A ZKOUŠEK (INSPEKČNÍ PLÁN)	PKZ č.: 1989-19 Rev.: 0
--	---	--	----------------------------

Výrobek: VÝMĚNÍK TEPLA							
Referenční dokumenty		Zákazník:		Smlouva č.:		Zakázka č.:	
-		Katedra energetiky		198919		S198919	
		Notifikovaná osoba:					
		p. Novák, SZÚ Brno					
REV.		ZPRACOVAL		ODSOUHLASIL	ODSOUHLASIL	ODSOUHLASIL	
		INSPEKTOR	TECHNOLOG	VEDOUCÍ ŘJ (zhotovitele)	Inspektor ŘJ (objednatele)	NOTIFIKOVANÁ OSOBA	
0	Jméno: Podpis: Datum.:		Ing. Jiří Vymyšlený	p. Pavel Neznámý	p. Lukáš Bartoš	p. Novák, SZÚ Brno	

		PLÁN KONTROL A ZKOUŠEK (INSPEKČNÍ PLÁN)	PKZ č.: 1989-19 Rev.: 0
--	---	--	----------------------------

VÝVOJ DOKUMENTU:

Rev. / 0. První vydání

Rozdělovník:	Kontrola jakosti OBJEDNATELE ŘJ zákazníka ZHOTOVITELE	1 originál
--------------	--	------------

POZNÁMKA:

	R	posuzovací bod (Review point) OBJEDNAVATEL provede posouzení záznamů/protokolů ze stanovených technických kontrol a zkoušek	HF	zádržný bod fakturační shodné jako v případě H s tím, že k tomuto zádržnému bodu má OBJEDNAVATEL oprávnění změnit platební kalendář v souladu s platebními a fakturačními podmínkami uvedenými ve SMLOUVĚ.	
	C	posuzovací bod s předáním záznamů protokolů ZHOTOVITEL provede, předloží a předá OBJEDNAVATELI k posouzení záznamy / protokoly ze stanovených kontrol a zkoušek	HI	shodné jako v případě H s tím, že výkon kontroly a zkoušky nebo přejímky provádí pro OBJEDNAVATELE inspekční orgán, který je uveden v organizačním schématu pro oblast realizace dodávky a oblast uvádění do provozu	
	W	svědečný/ověřovací bod (Witness Point) OBJEDNAVATEL musí být o tomto kroku informován podle dohodnutých podmínek. V případě, že se objednavatel svědečného bodu neúčastní, ZHOTOVITEL má právo pokračovat v další činnosti. Neúčast a výsledky kontrolního kroku musí být dokumentovány.	W/T plan	Svařovací a zkušební plán- je nedílnou součástí konstrukční dokumentace (VD)	
	H	zádržný bod (Hold Point) OBJEDNAVATEL musí být o tomto kroku informován podle dohodnutých podmínek. Bez provedení technické kontroly nebo zkoušky nelze pokračovat v další práci	VD	Výkresová dokumentace	

		PLÁN KONTROL A ZKOUŠEK (INSPEKČNÍ PLÁN)	PKZ č.: 1989-19 Rev.: 0
--	---	--	----------------------------

Číslo operace	Výrobní nebo kontrolní operace	Požadavky	Dokumenty pro záznamy výsledků	Body zájmů (posuzovací body)					
				VŠB-TU OSTRAVA	KATEDRA ENERGETIKY	NOTIFIKOVANÁ OSOBA			POZNÁMKA
Obecná část PKZ									
A1	Schválení a uvolnění výrobní dokumentace, pevnostní výpočet	Uvolňovací razítko, podpis, datum na jednotlivé dokumenty	Seznam uvolněné výrobní dokumentace, průběžná aktualizace	H	H	H			
A2	Kvalifikace svářečů a svářečských operátorů Kvalifikace NDT pracovníků	EN 287-1 ČSN EN 1418	Seznam svářečů Seznam inspektorů	H	R	H			
A3	Svařovací postupy	WPS a WPQR	Seznam WPS a WPQR	H	R	H			
A4	Svařování	Svařovací a zkušební plán	Všechny svarové spoje	H	R	H			
A5	Vstupní kontrola základních materiálů - Identifikace - Materiálové certifikáty VT - vizuální kontrola DT - rozměrová kontrola	Kusovník, technická specifikace, ČSN EN 10204	Materiálové inspekční certifikáty	H	R	R			



PLÁN KONTROL A ZKOUŠEK (INSPEKČNÍ PLÁN)

PKZ č.: 1989-19

Rev.: 0

Číslo operace	Výrobní nebo kontrolní operace	Požadavky	Dokumenty pro záznamy výsledků	Body zájmů (posuzovací body)					
				VŠB-TU OSTRAVA	KATEDRA ENERGETIKY	NOTIFIKOVANÁ OSOBA			POZNÁMKA
Výrobní část PKZ									
B1	Sestavení pro svařování, DT - rozměrová kontrola	Výrobní dokumentace	Protokol	H	H	R			
B2	Svařování, DT - rozměrová kontrola svarových spojů	ČSN EN 5817 EN ISO 6520-1	Protokol	H	H	R			
B3	Tepelné zpracování	Předpis TZ	Protokol, záznam TZ	H	R	R			
B4	Nedestruktivní zkoušení svarových spojů - VT, DT, MT, UT, tvrdost	ČSN EN 5817 EN ISO 6520-1 EN ISO 17640	Protokol	H	R	R			
B5	Vizuální a rozměrová kontrola na výměníku	ČSN EN 13445-5	Protokol	H	H	H			
B6	Tlaková zkouška hydraulická	ČSN EN 13445 Specifikace	Protokol se záznamem o průběhu tlakové zkoušky	H	H	H			
B7	Kontrola po tlakové zkoušce	ČSN EN 13445-5	Protokol	H	H	H			
B8	Konzervace, balení, značení	Výkres, specifikace		H	R	R			
B9	Závěrečná kontrola	Protokol o předání PTD	Zápis	H	H	H			
B10	Kontrola PTD	SoD, EC certifikát (NoBo), ES prohlášení	PTD	H	H	H			

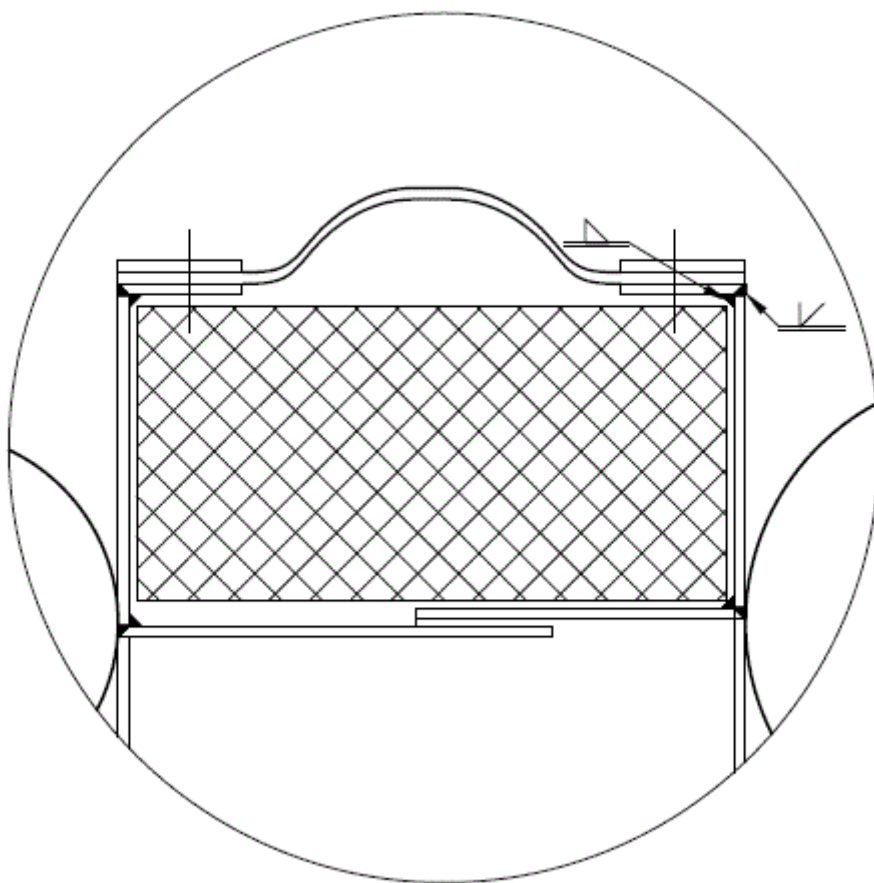
		PLÁN KONTROL A ZKOUŠEK (INSPEKČNÍ PLÁN)	PKZ č.: 1989-19 Rev.: 0
--	---	--	----------------------------

Číslo operace	Výrobní nebo kontrolní operace	Požadavky	Dokumenty pro záznamy výsledků	Body zájmů (posuzovací body)					
				VŠB-TU OSTRAVA	KATEDRA ENERGETIKY	NOTIFIKOVANÁ OSOBA			POZNÁMKA
Montážní část PKZ									
C1	Vstupní kontrola výměníku	Výkres, technické požadavky	Záznam v montážním deníku	H	H	R			
C2	Přejímka staveniště	Výkresová dokumentace	Záznam	H	H	R			
C3	Výškové a směrové nastavení výměníku	Požadavky výrobce, výkresová dokumentace	Protokol	H	R	R			
C4	Těsnostní zkouška (pokud je požadována)	Požadavky výrobce, výkresová dokumentace	Protokol	H	H	H			
C5	Opravné nátěry (pokud jsou požadovány)	Technická spec. nátěrového systému	Protokol	H	W	R			
C6	Izolace	Požadavky výrobce, výkresová dokumentace	Protokol	H	W	R			
C7	Závěrečná inspekce	Smlouva, protokol	Zápis	H	H	H			
C8	Kontrola PTD	SoD, EC certifikát (NoBo), ES prohlášení	PTD	H	H	H			

21 Projekční návrh

Spalovací zařízení i přechodový tah jsou konstrukčně provedeny jako krabice a MeS, které jsou zavěšeny na stropě ocelové konstrukce a dilatují svisle dolů a dále ve směru spalin výstupní díl OPVS v.č. FSKE-119011989 je proveden jako desková teplosměnná plocha. Celkem je sestaven ze 24 desek, každá deska má 25 trubek $\varnothing 60,3 \times 2,9$ [mm]. Desky prochází stropem i šikmým dnem mezitahu. V oblasti komory výsyvky je uspořádaná výsyпка pro odvod popílku ze vstupní části mezitahu, dno musí mít sklon v souladu se sypným úhlem popílku.

Výstupní část mezitahu (OPVS č. 4 a 3) má dno s malým sklonem, takže nad výsypkami, v této části jsou z MeS odstraněny praporky - popílek propadá do výsyvky. Utěsnění je provedeno osvědčeným tkaninovým těsněním viz. v.č. FSKE-119011989



Obrázek 21-1 Tkaninové těsnění

22 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout ohřívač parovzduchové směsi pro Flexibilní energetický systém a vytvoření výrobního a montážního Plánu kontrol a zkoušek pro energetické zařízení.

V teoretické části je popsáno použití Flexibilního energetického systému včetně přehledu všech technických norem a nařízení, které upravují spolehlivost energetických zařízení.

Ze zadaných hodnot paliva a parametrů kotle s pásovým roštem byla vypočtena stechiometrie a tepelné ztráty, ze kterých byla určena účinnost kotle.

Následujícími výpočty byl vypočten objemový a hmotnostní tok spalin a fyzikálně chemické vlastnosti parovzduchové směsi, které byly potřebné pro samotný návrh ohřívače.

Po konzultaci s vedoucím mé diplomové práce byl navržen výstupní díl ohřívače parovzduchové směsi, který je sestaven ze 24 desek, z nich každá deska je tvořena 25 trubkami o $\varnothing 60,3 \times 2,9$ [mm]. Šířka desky byla stanovena na 1610 [mm] a předpokládaná výška na 10000 [mm]. Pomocí výpočtů potřebných pro návrh ohřívače bylo vypočteno, že předpokládaná výška je v souladu s vypočtenou.

Těleso spalovací komory a těleso mezitahu, v němž jsou umístěny sálavé části ohřívače parovzduchové směsi č.5,4 a 3 jsou zavěšeny každá samostatně na stropě ocelové konstrukce, kde dilatují směrem dolů a vůči sobě ve směru proudění spalin - tedy vodorovně.

V grafické části je zobrazeno již zmiňované těleso mezitahu s několika řezy, detailem tkaninového těsnění s názornými svary a pohledem do výsypky.

Součástí závěrečné práce je také Plán kontrol a zkoušek, který je rozdělen do tří samostatných částí, v praxi bývá obvykle rozdělen do dvou a to obecná + výrobní část a obecná + montážní část, zde z důvodu větší přehlednosti byl rozdělen na část obecnou, výrobní a montážní. PKZ obsahuje sled všech technologických operací, které jsou dány technickými normami při výrobě a montáži a také požadavků na průvodní technickou dokumentaci, kde jsou zahrnuty veškeré dokumenty, jenž jsou předepsány Plánem kontrol a zkoušek, ale mohou vzniknout i jiné jakostní požadavky v průběhu kontrol a zkoušek, které jsou zdokumentovány a dokladovány v průvodní technické dokumentaci objednatelem daného výrobku, či celku.

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Ladislavu Vilimcovi a Ing. Jaroslavu Konvičkovi za ochotu, trpělivost a vedení při psaní mé diplomové práce.

23 Seznam použité literatury

- [1] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. PRAHA: ČVUT, 2007. 212 s.
- [2] JANEČEK, Z. *Zajišťování jakosti*. Plzeň: ZČU, 2001. 95 s.
- [3] Kudělka, V., Dolák F., Kadrnka P. *Tlaková zařízení a jejich sestavy, dokumentace, odborná způsobilost a kvalifikace výrobců*. Brno, 2013. 19 s.
- [4] Vítkovice power engineering a.s., *Technická specifikace díla*. Ostrava, 2011. 57 s.
- [5] Milčák, P. *Fyzikální vlastnosti parovzduchové směsi*. Ostrava, 2009. 21 s.
- [6] ČSN EN 287-1, *Zkoušky svářečů - Tavné svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2012. 36 s.
- [7] ČSN EN 1418, *Svářečský personál*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 16 s.
- [8] ČSN EN ISO 5817, *Svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2008. 28 s.
- [9] ČSN EN 10204, *Kovové výrobky - Druhy dokumentů kontroly*. Praha: Český normalizační institut, 2005. 12 s.
- [10] ČSN EN ISO 6520-1, *Svařování a příbuzné procesy*. Praha: Český normalizační institut, 2008. 68 s.
- [11] ČSN EN ISO 17640, *Nedestruktivní zkoušení svarů*. Praha: Český normalizační institut, 2011. 32 s.
- [12] ČSN EN ISO 13445, *Netopené tlakové nádoby*. Praha: Český normalizační institut, 2010. 40 s.

Seznam obrázků

Obrázek 5-1	Procentní složení spalín	23
Obrázek 18-2	Teplotní spád protiproudého zapojení	44
Obrázek 18-3	Protiproudé zapojení	45
Obrázek 19-1	Velikosti prostoru mezi deskami	54
Obrázek 21-1	Tkaninové těsnění	68

Seznam tabulek

Tabulka 6-1	Střední měrné tepelné kapacity základních složek spalín	24
Tabulka 8-1	Ztráty sdílením tepla do okolí	28
Tabulka 11-1	Tabulková hustota složek spalín	29
Tabulka 18-1	Výpočet parametrů ohříváku č. 3	46
Tabulka 18-2	Výpočet parametrů ohříváku č. 4	48
Tabulka 18-3	Výpočet parametrů ohříváku č. 5	50

Seznam schémat

Schéma 12-1	Schéma OPVS	32
Schéma 18-1	Výpočtové schéma OPVS	43

Seznam zkratk

FES	Flexibilní energetický systém
HRSG	Heat recovery steam generator
NV	Napájecí voda
OPVS	Ohřívák parovzduchové směsi
PKZ	Plán kontrol a zkoušek
PTD	Průvodní technická dokumentace
PVS	Parovzduchová směs

Seznam příloh

Výkres číslo FSKE–19011989